

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**EMANUELLI RODRIGUES**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO EM COBERTURAS METÁLICAS EM  
ARCO SOB AÇÃO DO VENTO: ESTUDO DE CASO NO GINÁSIO DE ESPORTES  
MARIO NARDI, RENASCENÇA-PR**

**PATO BRANCO  
2025**

**EMANUELLI RODRIGUES**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO EM COBERTURAS METÁLICAS EM  
ARCO SOB AÇÃO DO VENTO: ESTUDO DE CASO NO GINÁSIO DE ESPORTES  
MARIO NARDI, RENASCENÇA-PR**

**Analysis of the Influence of Slope on Arched Metal Roofs Under Wind Action:  
Case Study at the Mario Nardi Sports Gymnasium, Renascença-PR**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Paola Regina Dalcanal.  
Coorientador(a): Prof<sup>a</sup>. Ana Claudia Dal Prá Vasata

**PATO BRANCO**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**EMANUELLI RODRIGUES**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO EM COBERTURAS METÁLICAS EM  
ARCO SOB AÇÃO DO VENTO: ESTUDO DE CASO NO GINÁSIO DE ESPORTES  
MARIO NARDI, RENASCENÇA-PR**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Paola Regina Dalcanal.  
Coorientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Ana Claudia Dal Prá Vasata

Data de aprovação: 05/dezembro/2025

---

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Paola Regina Dalcanal  
Doutorado em Engenharia Civil - Estruturas - PUC-RIO  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PB)

---

Prof<sup>ª</sup> Ana Claudia Dal Prá Vasata  
Mestre em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PB)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Priscila Ongoratto Trentin  
Doutorado em programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFPR  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PB)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>º</sup> Volmir Sabbi  
Doutorado em Educação - UEM  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PB)

**PATO BRANCO**

**2025**

Àqueles que amo, que me ensinaram a nunca  
desistir.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à Nossa Senhora Aparecida, pela proteção e serenidade nos momentos mais desafiadores desta caminhada. Foi na fé que encontrei equilíbrio e tranquilidade para seguir adiante, mesmo quando o caminho parecia cansativo.

À minha família, deixo minha profunda gratidão pelo apoio constante. Cada gesto de confiança e compreensão fez diferença e tornou possível chegar até aqui. Em maneira especial, ao meu sobrinho Nicolas, que, mesmo tão pequeno, se tornou uma grande fonte de motivação. Sua alegria e espontaneidade iluminaram dias difíceis e me lembraram do valor de continuar.

Aos amigos que estiveram ao meu lado durante essa etapa, obrigada pelo incentivo, pela leveza das conversas e pela companhia sincera. O apoio de vocês tornou o processo mais leve e mais possível.

Agradeço também a minha orientadora e a minha coorientadora, pelo apoio, pelas conversas e por todo o carinho que tiveram por mim.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, seja com uma palavra, um gesto ou um simples voto de confiança. A todos, meu sincero agradecimento.

A fé é acreditar naquilo que você não vê, a recompensa dessa fé é ver aquilo que você acredita.

(SANTO AGOSTINHO, 397).

## RESUMO

As estruturas metálicas têm se destacado pela versatilidade, leveza, rapidez construtiva e elevada eficiência mecânica, características que as tornam amplamente utilizadas em edificações esportivas e em obras de grande vão, nas quais o controle de deformações e a estabilidade global são fatores determinantes para a segurança. Este trabalho apresenta a análise estrutural de uma cobertura metálica em arco destinada ao ginásio de esportes Mário Nardi, localizado no município de Renascença-PR, com foco na avaliação do comportamento da treliça frente à ação do vento e à variação de sua inclinação. A justificativa do estudo está relacionada à relevância do correto dimensionamento de coberturas metálicas submetidas a ações significativas do vento, especialmente em edificações esportivas com grandes áreas livres, onde deslocamentos excessivos podem comprometer o desempenho estrutural. A metodologia contemplou a definição da geometria da estrutura, o cálculo das cargas permanentes e variáveis, a determinação do peso próprio dos perfis, a obtenção das ações do vento pelo software Visual Ventos® e, posteriormente, a modelagem e análise da treliça no software Ftool®, no qual as cargas foram aplicadas diretamente nos nós para extração dos esforços axiais e deslocamentos. Os resultados demonstraram que, para as combinações analisadas, a variação da inclinação influencia significativamente tanto os esforços solicitantes quanto os deslocamentos estruturais, indicando que a escolha da inclinação adequada é essencial para garantir segurança, desempenho e economia na concepção de coberturas metálicas em arco.

Palavras-chave: estruturas metálicas; treliça em arco; ação do vento; análise estrutural.

## ABSTRACT

Steel structures are widely recognized for their versatility, lightness, constructive efficiency, and mechanical performance, which make them suitable for sports facilities and long-span buildings where the control of deformations and overall stability are crucial for structural safety. This study presents the structural analysis of a steel arch roof designed for the Mário Nardi sports gymnasium, located in the municipality of Renascença, Paraná, with emphasis on evaluating the behavior of the truss under wind action and the variation of its inclination. Steel structures are widely recognized for their versatility, lightness, constructive efficiency, and mechanical performance, which make them suitable for sports facilities and long-span buildings where the control of deformations and overall stability are crucial for structural safety. The relevance of this research lies in the correct design of metallic roofs subjected to significant wind loads, especially in gymnasiums with large unobstructed areas, where excessive displacements may impair structural performance. The methodological approach comprised defining the geometry of the structure, calculating permanent and variable loads, estimating the self-weight of the steel members, obtaining wind actions using Visual Ventos®, and subsequently modeling and analyzing the truss in Ftool®, where loads were applied directly to the nodes to extract axial forces and displacements. The results indicated that the inclination significantly influences both the internal forces and the structural displacements, demonstrating that selecting an appropriate inclination is essential to ensure safety, performance, and efficiency in the design of steel arch roofs.

Keywords: steel structures; arched truss; wind action; structural analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação de cobertura metálica em arco .....	17
Figura 2: Telha metálica autoportante .....	18
Figura 3: Estrutura com ligação rígida .....	19
Figura 4: Peça soldada .....	20
Figura 5: Peça parafusada .....	20
Figura 6: Estádio Mineirinho - MG .....	21
Figura 7: Estádio Olímpico de Munique - Alemanha .....	21
Figura 8: Palácio dos Esportes de Roma .....	22
Figura 9: Estrutura com ligação flexível .....	22
Figura 10: Terminal 2 - Aeroporto Charles de Gaulle - Paris .....	23
Figura 11: Estádio Fonte Nova – Salvador .....	23
Figura 12: Perfis laminados .....	24
Figura 13: Perfis laminados a frio .....	25
Figura 14: Estabilidade aerodinâmica em diferentes inclinações .....	26
Figura 15: Mapa das Isopletas .....	28
Figura 16: Aço especificados por Normas Técnicas para uso estrutural .....	32
Figura 17: Fluxograma .....	38
Figura 18: Apresentação do Ginásio Mario Nardi .....	39
Figura 19: Componentes da Treliça Metálica .....	39
Figura 20: Treliça real com ângulo de 31°, via AutoCAD .....	40
Figura 21: Entrada no software com parâmetros de dimensão .....	41
Figura 22: Inserção da Velocidade Básica da região no software .....	42
Figura 23: Fator S1 .....	43
Figura 24: Fator S2 .....	43
Figura 25: Fator S3 .....	44
Figura 26: Cpe médio – paredes .....	44
Figura 27: Cpe médio – Telhados .....	45
Figura 28: Cpi – VisualVentos .....	45
Figura 29: Inserção de nós por coordenadas .....	46
Figura 30: Propriedades do aço no Ftool .....	47
Figura 31: Propriedades do aço no Ftool .....	47
Figura 32: Inserção de apoio fixo pelo Ftool .....	48

<b>Figura 33: Inserção de apoio móvel pelo Ftool .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 34: Variação de treliça de 20° à 50° .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 35: Abóbodas cilíndricas de seção circular .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 36: Coeficiente de pressão externa, cpe, para vento soprando perpendicularmente a geratriz da estrutura.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 37: Gráfico da variação da velocidade e da pressão do vento.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 38: Valores dos coeficientes de ponderação .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 39: Valores de combinação e de redução para ações variáveis .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 40: Comparação entre deslocamento máximo e deslocamento real .....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1: Medidas dos Perfis de cada componente .....</b>	<b>40</b>
<b>Quadro 2: Cargas permanentes da treliça .....</b>	<b>52</b>
<b>Quadro 3: Fatores S1,S2 e S3 para cada inclinação, via VisualVentos .....</b>	<b>54</b>
<b>Quadro 4: Velocidade Característica e Pressão dinâmica.....</b>	<b>55</b>
<b>Quadro 5: Coeficientes de pressão externa.....</b>	<b>55</b>
<b>Quadro 6: Relação de medidas .....</b>	<b>56</b>
<b>Quadro 7: Cpe de cada faixa, para cada inclinação .....</b>	<b>57</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.1.1	Objetivo geral .....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Cobertura Metálica Tipo Arco</b> .....	<b>17</b>
2.1.1	Ligações .....	19
2.1.2	Perfis mais utilizados.....	24
2.1.3	Inclinações .....	25
<b>2.2</b>	<b>Ações do vento em estruturas de cobertura segundo NBR 6123 (ABNT, 2023)</b> .....	<b>26</b>
2.2.1	Cálculo da Pressão do Vento .....	26
2.2.2	Velocidade básica do vento ( $V_0$ ).....	27
2.2.3	Fator topográfico ( $S_1$ ) .....	28
2.2.4	Fator de rugosidade ( $S_2$ ) .....	29
2.2.5	Fator estatístico ( $S_3$ ).....	30
<b>2.3</b>	<b>Utilização do software VisualVentos para análise dos esforços do vento em coberturas</b> .....	<b>30</b>
<b>2.4</b>	<b>Dimensionamento de estruturas metálicas de cobertura em arco segundo a NBR 8800 (ABNT,2024)</b> .....	<b>31</b>
2.4.1	Propriedades do aço .....	31
2.4.2	Levantamento de ações .....	32
2.4.3	Verificações.....	33
2.4.4	Critérios de Dimensionamento e Equações de Verificação.....	34
<u>2.4.4.1</u>	<u>Tração simples</u> .....	<u>35</u>
<u>2.4.4.2</u>	<u>Compressão simples</u> .....	<u>35</u>
<b>2.5</b>	<b>Modelagem e análise estrutural no software Ftool</b> .....	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Apresentação da estrutura analisada</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Dimensionamento</b> .....	<b>41</b>

3.2.1	Verificação da ação do vento .....	41
3.2.2	Análise dos esforços internos e deslocamentos.....	46
3.2.3	Geometria.....	49
3.2.4	Carregamento.....	50
3.2.5	Procedimentos de Análise .....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Peso próprio .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>Sobrecarga de manutenção .....</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Ações do vento.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4</b>	<b>Combinação das ações.....</b>	<b>58</b>
<b>4.5</b>	<b>Verificação de dimensionamento.....</b>	<b>60</b>
4.5.1	Verificação à tração – Seção bruta.....	60
4.5.2	Verificação à tração – Seção líquida .....	61
4.5.3	Verificação à compressão – Banzos, diagonais e montantes .....	61
4.5.4	Comportamento dos esforços.....	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas metálicas no Brasil teve início no final do século XIX, quando as primeiras peças metálicas, importadas da Europa, começaram a ser empregadas em obras no território nacional (CBCA, 2015). Esse cenário se manteve até 1946, com a fundação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), primeira siderúrgica do país, que marcou o início da produção nacional de aço. Esse marco reduziu progressivamente a dependência da importação e impulsionou o desenvolvimento da construção metálica brasileira.

Inicialmente, a produção da CSN era voltada principalmente ao setor industrial. Somente após a criação do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) é que o uso do aço passou a se expandir para a construção civil, sendo mais expressivo nas regiões Sudeste e Sul do país (CBCA, 2016).

Um fator relevante para o dimensionamento de estruturas metálicas em determinadas regiões é a ação do vento. A região Sudoeste do Paraná apresenta historicamente altos índices de velocidade do vento, conforme indicado pelo mapa de isopletas da NBR 6123 (ABNT, 2023), o que justifica atenção especial no projeto de coberturas metálicas. Todavia, eventos extremos recentes mostram que a ação do vento pode superar largamente valores usuais de projeto. Em 7 de novembro de 2025, o município de Rio Bonito do Iguaçu, localizado no sudoeste do Paraná, foi atingido por um tornado, classificado como um F4, que destruiu cerca de 80% da cidade, deixando um rastro de destruição e danos catastróficos, conforme reportagem da rede Globo de comunicação (G1, 2025). Esse evento evidencia que a região é vulnerável a fenômenos climáticos extremos e reforça a justificativa da presente pesquisa: a necessidade de avaliar o comportamento estrutural de coberturas metálicas submetidas a ventos intensos e variáveis, especialmente em edificações esportivas de grande vão, cujas treliças em arco estão entre os elementos mais expostos às sobrepressões e sucções do vento.

Além disso, coberturas com diferentes inclinações e formas respondem de maneira distinta às ações do vento, o que reforça a importância de uma análise criteriosa dessas interações, especialmente em locais com elevada velocidade característica de vento. Essa flexibilidade geométrica das estruturas espaciais permite uma ampla gama de arranjos estruturais. A escolha do modelo mais adequado

depende de fatores como a forma e dimensão da edificação, os pontos de apoio disponíveis e o tipo de ligação empregado. Esses aspectos impactam diretamente a eficiência estrutural, bem como a viabilidade técnica e econômica do projeto.

Sendo assim, este trabalho se propõe a responder como a ação do vento influencia na solicitação de coberturas metálicas em arco com diferentes inclinações.

Para tanto o primeiro capítulo introduz o tema da pesquisa, sua relevância e os objetivos da mesma. O segundo capítulo apresenta o referencial teórico que embasa a pesquisa. O terceiro trata sobre a metodologia utilizada para realização da pesquisa, e o quarto capítulo compreende a concepção da estrutura e análise dos resultados obtidos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo do presente trabalho é analisar o comportamento de uma cobertura metálica do tipo arco, frente a ação de ventos, de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023), em função da variação de inclinação.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Identificar os tipos de cobertura em arco, quais as inclinações mais usuais e se existe relação com algum outro parâmetro;
- Analisar tipos de ligações entre a cobertura e a estrutura da edificação para que atenda as solicitações;
- Aplicar o método de levantamento das ações de vento segundo a NBR 6123 (ABNT, 2023);
- Avaliar como o software VisualVentos considera as ações do vento;
- Avaliar a influência da ação do vento nos esforços e comportamento da cobertura do estudo de caso, utilizando o software Ftool, variando a inclinação da cobertura.

## 1.2 Justificativa

Nos últimos anos, especialmente a partir de 2012, observou-se no Brasil um aumento significativo na ocorrência de ventos com velocidades superiores a 100 km/h, os quais resultaram em prejuízos superiores a R\$ 12 bilhões, além de inúmeros acidentes (INMET, 2024; CNM, 2024). Nesse contexto, destaca-se a relevância do estudo das ações do vento sobre as edificações, principalmente em regiões com elevada velocidade característica de vento.

De acordo com o mapa de isopletas apresentado pela NBR 6123 (ABNT, 2023), a cidade de Renascença-PR, objeto deste estudo, apresenta a segunda maior velocidade básica de vento do país, atingindo 45 m/s. Essa condição intensifica a necessidade de uma análise criteriosa das estruturas, especialmente das coberturas metálicas, que são elementos particularmente vulneráveis à ação do vento.

A segurança das edificações frente a essas ações é fortemente influenciada pelo desempenho da cobertura e da estrutura do telhado, sendo essas as partes mais suscetíveis a danos como arrancamentos parciais ou totais, sobretudo em edificações com telhados leves e grandes vãos, como galpões e ginásios. Tais falhas, frequentemente, decorrem do não atendimento adequado aos efeitos provocados pelo vento (BLESSMANN, 2001).

Diante disso, justifica-se a importância deste trabalho, o qual tem como base a NBR 6123 (ABNT, 2025), norma que estabelece os critérios para determinação das ações do vento, considerando a velocidade básica no local de implantação da estrutura. Além desse fator, a norma também considera outros parâmetros relevantes, como a altura da edificação, a geometria da estrutura e a topografia do terreno. Esses fatores influenciam diretamente os esforços solicitantes nas ligações metálicas, as quais, se corretamente dimensionadas, garantem a adequada transmissão dos esforços, evitam colapsos locais, promovem uma distribuição uniforme das cargas e contribuem para a durabilidade e segurança da estrutura.

Assim, com base nos projetos disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Renascença-PR, o presente estudo analisou o comportamento estrutural de uma cobertura em arco metálico submetida à ação do vento, especificada de acordo com os parâmetros estabelecidos pela NBR 6123 (ABNT, 2023). Para isso, serão utilizado o software VisualVentos. O software Ftool, também disponibilizado gratuitamente para fins estudantis, foi empregado para a avaliação dos esforços internos e dos

deslocamentos na treliça metálica. Por meio do Ftool, foi possível modelar a geometria da estrutura, aplicar as cargas permanentes e de vento previamente determinadas e, assim, obter os diagramas de força axial e as deformações nodais correspondentes. Esses resultados permitiram verificar o comportamento estrutural da treliça sob diferentes inclinações e subsidiaram a posterior verificação dos perfis metálicos conforme a NBR 8800 (ABNT, 2024).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico reúne os fundamentos necessários para compreender o comportamento de coberturas metálicas em arco submetidas à ação do vento. Inicia-se pela caracterização das treliças metálicas arqueadas, seus elementos constituintes e particularidades geométricas. Na sequência, apresentam-se os principais parâmetros da NBR 6123 (ABNT, 2023) para determinação das pressões de vento, bem como a forma como o software VisualVentos® os aplica no cálculo. Também são abordados os critérios da NBR 8800 (ABNT, 2024) para o dimensionamento de estruturas metálicas. Por fim, descrevem-se os aspectos essenciais da modelagem e análise no software Ftool®, utilizado para a obtenção dos esforços internos e deslocamentos da treliça estudada.

### 2.1 Cobertura Metálica Tipo Arco

As coberturas metálicas em arco, conforme Figura 1, são amplamente utilizadas em obras de grande vão livre, como ginásios e galpões, devido à sua capacidade de distribuição eficiente de esforços.

**Figura 1: Representação de cobertura metálica em arco**



**Fonte: Estruturas Jaguari (2025)**

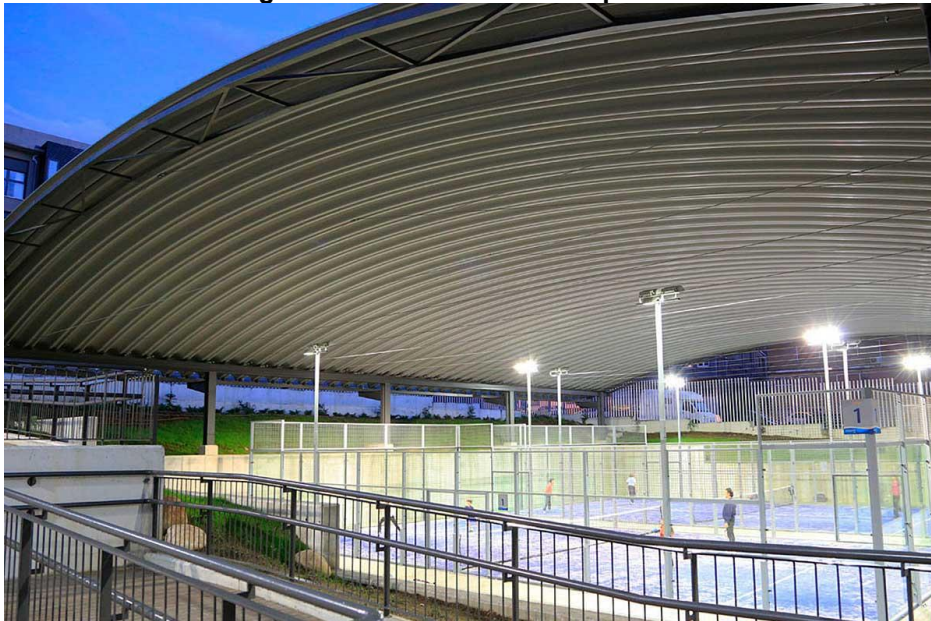
Segundo Pfeil (2008), esse tipo de estrutura aproveita a forma curva para otimizar a resistência à compressão e minimizar deslocamentos verticais. A geometria

em arco favorece a estabilidade global e permite menor quantidade de material em comparação com estruturas retas.

Além da eficiência estrutural, as coberturas metálicas em arco costumam ser compostas por perfis leves de aço galvanizado, frequentemente apoiadas em treliças ou arcos contínuos, conforme a necessidade de vão e carregamento. Essas estruturas são projetadas para facilitar a montagem e reduzir o tempo de execução da obra, o que as torna bastante vantajosas em projetos industriais e esportivos.

Segundo Chwedler (2009), é comum o uso de telhas metálicas autoportantes (Figura 2), que se adaptam bem à curvatura da estrutura e contribuem para o conforto térmico e acústico do ambiente. A forma arqueada favorece o escoamento da água da chuva, dispensando grandes pendentes ou sistemas complexos de drenagem, o que também simplifica a manutenção ao longo do tempo.

**Figura 2: Telha metálica autoportante**



**Fonte: Grupo AçoPlano (2025)**

Desse modo, esse tipo de cobertura alia funcionalidade, estética e economia, sendo uma solução recorrente quando se busca leveza estrutural e grandes vãos livres com desempenho adequado.

### 2.1.1 Ligações

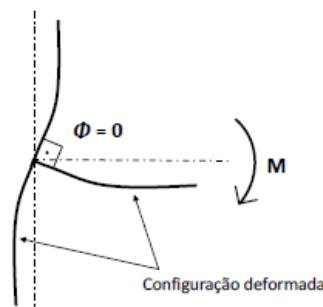
As ligações representam elementos críticos para o desempenho estrutural, especialmente em coberturas com geometria curva, onde predominam esforços significativos de tração e compressão. De acordo com Silva et al. (2017), a escolha entre ligações rígidas ou articuladas influencia diretamente a redistribuição dos esforços internos, bem como o comportamento global da estrutura. Além disso, é amplamente reconhecido que falhas estruturais em sistemas metálicos estão frequentemente associadas a ligações mal projetadas ou mal executadas.

Nesse contexto, a execução de estruturas metálicas exige a conexão adequada entre os elementos estruturais, visto que os perfis metálicos são fabricados com dimensões limitadas, principalmente devido às restrições logísticas de transporte. Tais ligações são, em geral, realizadas por meio de soldas ou parafusos, conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 8800 (ABNT, 2024).

Por serem pontos fundamentais para a integridade do sistema estrutural, as ligações requerem atenção especial tanto na fase de projeto quanto durante a montagem. Uma ligação com dimensionamento inadequado ou execução deficiente pode comprometer a estabilidade e a segurança global da estrutura.

Segundo Pfeil (2022), as ligações podem ser classificadas como rígidas ou flexíveis. As ligações rígidas são capazes de transmitir esforços cortantes, axiais e também momentos fletores entre os elementos, restringindo a rotação relativa entre eles. Nesse contexto, esse tipo de ligação é comum na conexão entre os arcos principais da cobertura e os pilares de suporte, garantindo a continuidade estrutural e a rigidez necessária, como mostrado na Figura 3.

**Figura 3: Estrutura com ligação rígida**

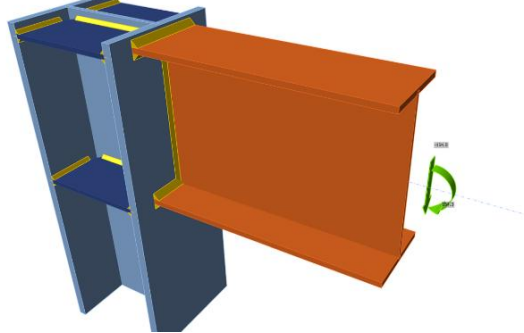


**Fonte: Pfeill (2009)**

Na prática, a execução de ligações rígidas em estruturas metálicas pode ser realizada por meio de soldas completas ou por conexões parafusadas com chapas de

ligação espessas e bem dimensionadas. Quando soldadas, as peças são previamente posicionadas e unidas por cordões de solda ao longo de suas seções, garantindo uma continuidade quase monolítica, como apresenta a Figura 4.

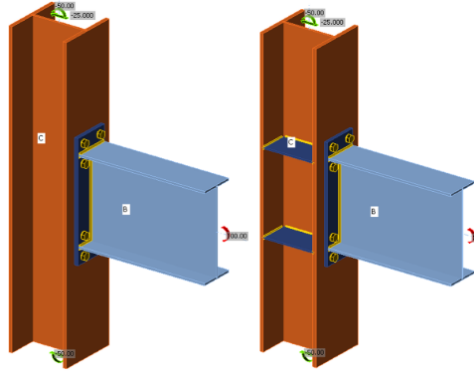
**Figura 4: Peça soldada**



Fonte: Ideastática (2025)

Já as conexões parafusadas exigem um projeto preciso das chapas de ligação, onde o número e o diâmetro dos parafusos devem ser compatíveis com os esforços atuantes e com as exigências de rigidez rotacional, sendo representados na Figura 5.

**Figura 5: Peça parafusada**



Fonte: Ideastática (2025)

Em ambos os casos, o detalhamento deve seguir os critérios estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2024).

Exemplos notáveis de estruturas que utilizam ligações rígidas em coberturas curvas incluem o Ginásio do Mineirinho, em Belo Horizonte – MG (Figura 6), cuja cobertura metálica em arco é conectada rigidamente aos pilares periféricos.

**Figura 6: Estádio Mineirinho - MG**



**Fonte: Uol (2022)**

O Estádio Olímpico de Munique (Figura 7), na Alemanha, que utiliza uma combinação de cabos e elementos metálicos com ligações estratégicas que proporcionam rigidez em pontos-chave da cobertura curva.

**Figura 7: Estádio Olímpico de Munique - Alemanha**



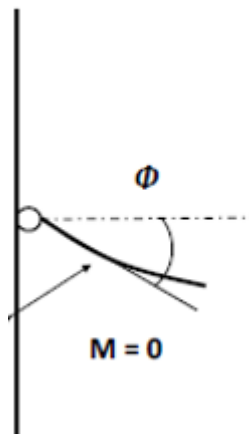
**Fonte: ArchDaily (2012)**

Outro exemplo emblemático é o Palácio dos Esportes de Roma (Palazzetto dello Sport), projetado por Pier Luigi Nervi (Figura 8), onde a forma em arco da cobertura é combinada com ligações estruturais que garantem a estabilidade e o comportamento integrado do sistema.

**Figura 8: Palácio dos Esportes de Roma**

Fonte: ArchDaily (2012)

Por sua vez, nas ligações flexíveis, considera-se que não há transmissão de momento fletor, assumindo-se um comportamento rotulado, no qual a rotação entre os elementos conectados é permitida. Esse tipo de ligação pode ser utilizado nas conexões entre terças e os arcos principais, facilitando a montagem, como representado na Figura 9.

**Figura 9: Estrutura com ligação flexível**

Fonte: Pfeill (2009)

A execução prática de ligações flexíveis é comumente realizada por meio de conexões parafusadas com chapas de ligação finas e parafusos dispostos com certa folga, de modo a permitir o giro entre as peças. Diferente das ligações rígidas, nesse caso não há necessidade de chapas espessas ou soldas completas, o que reduz o custo, o tempo de execução e a complexidade dos detalhes estruturais. Além disso, algumas ligações flexíveis podem ser feitas com soldas parciais, posicionadas estrategicamente para transmitir apenas os esforços axiais, preservando a liberdade rotacional no plano da ligação.

Esse tipo de ligação é amplamente utilizado em obras de grande porte que fazem uso de estruturas metálicas curvas. Um exemplo conhecido é o Terminal 2 do Aeroporto Charles de Gaulle, em Paris, cuja cobertura utiliza arcos metálicos longitudinais com terças articuladas, facilitando a montagem e absorvendo movimentações térmicas sem comprometer o desempenho da estrutura (Figura 10).

**Figura 10: Terminal 2 - Aeroporto Charles de Gaulle - Paris**



**Fonte:Allamy (2009)**

No Brasil, destaca-se a cobertura do Estádio Fonte Nova, em Salvador (Figura 11), onde as terças também são conectadas de forma rotulada aos arcos principais, permitindo um comportamento mais flexível e eficiente durante o processo construtivo e ao longo da vida útil da estrutura.

**Figura 11: Estádio Fonte Nova – Salvador**

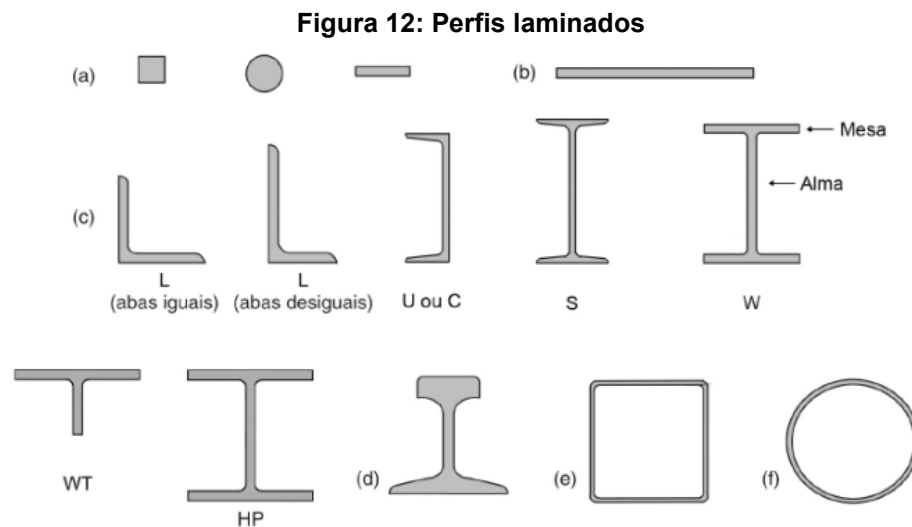


**Fonte:Correio do Povo (2023)**

### 2.1.2 Perfis mais utilizados

Os perfis tubulares circulares e retangulares são amplamente empregados em estruturas arqueadas por sua boa relação rigidez/peso e resistência à flambagem. Segundo Souza (2022), perfis tubulares permitem construções mais leves e esteticamente agradáveis. Já os perfis em “I”, laminados ou soldados, são utilizados quando há exigência de maior resistência à flexão.

De acordo com Pfeil (2022), os perfis laminados produzidos com maior eficiência são os perfis do tipo U ou C, L, H e I. Os perfis H, I e U, em particular, são fabricados em grupos padronizados, nos quais a altura permanece constante e a largura das abas varia, conforme ilustrado na Figura 12, são identificados os principais produtos siderúrgicos laminados de utilização estrutural, sendo, (a) barras com diversas seções transversais (quadrada, redonda, chata); (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) tubo quadrado; (f) tubo redondo.



Fonte: Pfeil (2022)

Além dos perfis laminados a quente, existem os perfis laminados a frio, os quais, segundo Pfeil (2009), são obtidos a partir da conformação de chapas planas de aço por meio de dobras a frio, originando os chamados perfis de chapa dobrada. Essas dobras são realizadas em prensas, utilizando-se gabaritos que controlam os raios internos das peças, de modo a garantir o atendimento aos valores mínimos exigidos, evitando a ocorrência de fissuras no aço durante o processo de conformação.

Em geral, a fabricação desses perfis utiliza chapas finas, com espessura máxima de 3 mm. Essa característica torna os perfis mais suscetíveis a problemas de instabilidade, os quais não são comuns nos perfis laminados a quente. A conformação por dobra permite a criação de uma grande variedade de geometrias, podendo-se obter seções transversais com um, nenhum ou múltiplos eixos de simetria, variando desde formas simples até configurações mais complexas. A Figura 13 apresenta algumas possíveis seções transversais de perfis dobrados (PFEIL, 2022).

**Figura 13: Perfis laminados a frio**



Fonte: Pfeil (2022)

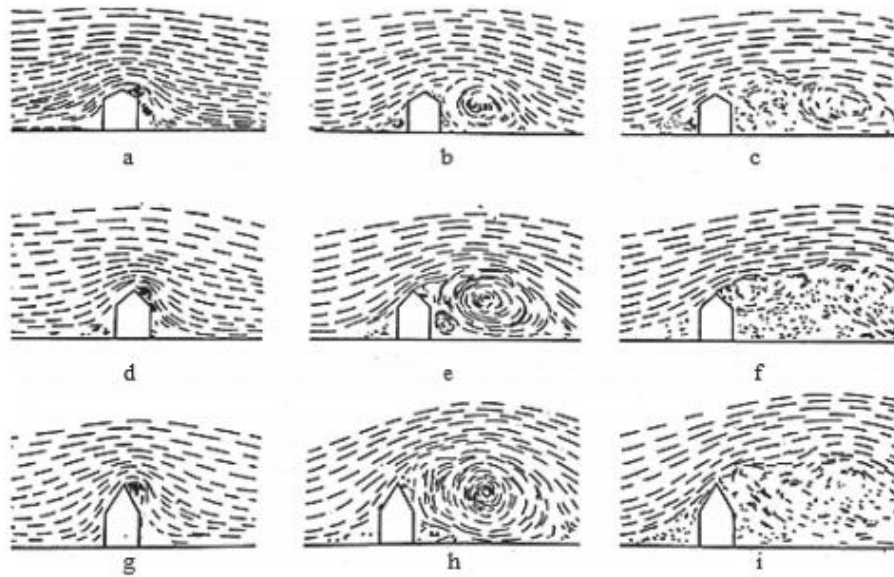
Na região sudoeste do Paraná, é comum o uso de tubos metálicos circulares galvanizados na estrutura principal de coberturas em arco, devido à boa resistência e facilidade de fabricação local, segundo pesquisa de mercado. Perfis do tipo “Z” e “U”, dobrados a frio, também são amplamente utilizados, principalmente como terças, por serem leves e econômicos. Em projetos com vãos maiores ou formas diferenciadas, podem ser adotados perfis soldados sob medida, garantindo maior eficiência estrutural. A escolha dos perfis considera a disponibilidade regional, o desempenho estrutural e o custo da obra.

### 2.1.3 Inclinações

A inclinação da cobertura influencia diretamente na resposta estrutural à ação do vento. De acordo com Blessman (2009), inclinações entre 20° e 40° são consideradas ideais para coberturas metálicas em regiões que apresentam uma maior incidência de ventos, como representado na Figura 14.

As subfiguras (a-d-g) 30°, (b-e-h) 45° e (c-f-i) 60° mostram a variação do escoamento do vento conforme a inclinação, evidenciando o aumento progressivo das regiões de sucção à medida que o ângulo aumenta.

**Figura 14: Estabilidade aerodinâmica em diferentes inclinações**



Fonte: Blessmann (2009)

## 2.2 Ações do vento em estruturas de cobertura segundo NBR 6123 (ABNT, 2023)

A norma NBR 6123 (ABNT, 2023), estabelece diretrizes para o cálculo da ação do vento em edificações, considerando fatores como rugosidade do terreno, altura da edificação, topografia e geometria estrutural. Segundo a NBR 6123 (ABNT, 2023), a pressão do vento é calculada a partir da velocidade básica ajustada por coeficientes de exposição, forma e dinâmica.

### 2.2.1 Cálculo da Pressão do Vento

A pressão do vento é calculada por meio da Equação 01:

$$\rho = 0,613 \times V^2 \quad (01)$$

Em que:

- $\rho$  é a pressão dinâmica do vento, utilizada como base para a aplicação de cargas na estrutura;
- $V$  é a velocidade característica do vento, corrigida a partir da velocidade básica  $V_0$  em m/s.

A velocidade característica  $V$  leva em consideração diversos fatores locais e estatísticos, sendo definida pela Equação 02, como:

$$V = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (02)$$

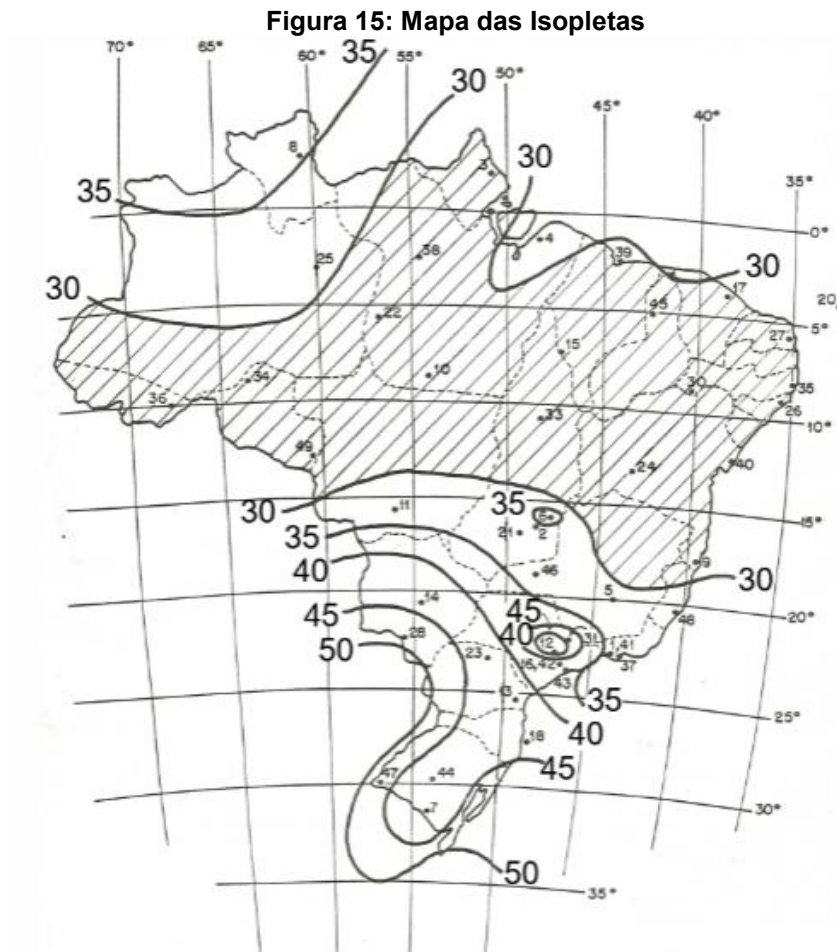
Onde:

- $V_0$  é a velocidade básica fornecida pelo mapa das isopletas;
- $S_1$  é o fator topográfico que considera a influência do relevo;
- $S_2$  é o fator de rugosidade que leva em consideração o entorno da edificação;
- $S_3$  é o fator baseado em conceitos probabilísticos.

Esses fatores ajustam a velocidade básica às condições reais do local onde se insere a edificação, sendo então utilizados para o cálculo da pressão que, por sua vez, é multiplicada pelos coeficientes de forma específicos das superfícies externas e internas da estrutura. O produto final determina a pressão efetiva aplicada à edificação, a qual servirá como entrada no modelo estrutural para simulação das ações do vento.

### 2.2.2 Velocidade básica do vento ( $V_0$ )

A velocidade básica do vento, considerada pela norma NBR 6123 (ABNT, 2023), é uma rajada de 3s, a 10m acima do terreno, em campo aberto e pleno, excedida em média uma vez em 50 anos. Em regra geral, é admitido que o vento básico pode soprar em qualquer direção horizontal. O valor dessa velocidade básica do vento pode ser admitido a partir do mapa das isopletas (Figura 15).



Fonte: NBR 6123 (ABNT,2023)

A cidade em que está localizado o estudo de caso, Renascença- PR, apresenta uma velocidade básica de 45m/s.

### 2.2.3 Fator topográfico ( $S_1$ )

Além da velocidade básica, outros fatores devem ser levados em consideração, sendo um deles o fator topográfico  $S_1$ , que é definido por meio dos diferentes tipos de terreno, sendo determinado do seguinte modo:

- Terreno plano ou fracamente acidentado:  $S_1=1,0$ ;
- Taludes e morros:  $1,0 < S_1 < 1,1$ ;
- Vales profundos, protegidos de vento de qualquer direção:  $S_1 = 0,9$

#### 2.2.4 Fator de rugosidade ( $S_2$ )

O fator de rugosidade é definido pelo efeito combinado da rugosidade do terreno, com a velocidade do vento que varia de acordo com as dimensões da edificação e da altura acima do terreno, sendo essa classificada em algumas categorias:

- Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Como exemplo disso, tem-se, mar calmo, lagos, rios e pântanos sem vegetação;
- Categoria II: Terrenos abertos, em nível ou de forma aproximada, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas;
- Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos: granjas e casas de campo;
- Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zonas florestais, industriais e urbanizadas. Exemplo: zonas de parques e bosques, cidades pequenas e seus arredores;
- Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos: Centro de grandes cidades.

A NBR 6123 (ABNT, 2023), além de classificar a rugosidade do terreno, também define classes conforme as dimensões da edificação. Essas classes são divididas da seguinte forma:

- Classe A: inclui elementos de vedação, peças de fixação e componentes estruturais isolados, sem função de vedação. Abrange edificações cuja maior dimensão, seja ela na horizontal ou na vertical, não ultrapasse 20 metros;
- Classe B: refere-se a edificações com a maior dimensão (horizontal ou vertical) variando entre 20 e 50 metros;
- Classe C: compreende edificações cuja maior dimensão, independentemente da direção, seja superior a 50 metros, especialmente quando a face exposta ao vento ultrapassa esse valor.

### 2.2.5 Fator estatístico ( $S_3$ )

Esse fator é definido com base em conceitos estatísticos e considera o nível de segurança exigido ao longo da vida útil da edificação. Na ausência de uma norma específica que estabeleça os fatores de segurança, ou caso a norma estrutural não forneça orientações claras sobre esses valores, devem ser adotados os valores mínimos recomendados para o fator estatístico.

## 2.3 Utilização do software VisualVentos para análise dos esforços do vento em coberturas

O VisualVentos é um software brasileiro gratuito desenvolvido pela Etools para auxiliar no projeto e dimensionamento de estruturas metálicas. Ele permite a modelagem de estruturas como pórticos, tesouras e arcos, facilitando a análise de esforços e o dimensionamento conforme as normas técnicas brasileiras.

Para a determinação das pressões do vento atuantes sobre a estrutura da cobertura metálica em arco, foi utilizado o software VisualVentos, que realiza os cálculos conforme os critérios estabelecidos pela norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 2023). O programa fornece de forma automatizada as pressões estáticas equivalentes do vento sobre as superfícies da edificação, permitindo maior precisão e agilidade na etapa de análise estrutural.

Os dados de entrada exigidos pelo software incluem a localização da obra, que é utilizada para obter a velocidade básica do vento a partir do mapa normativo; a categoria do terreno, que está relacionada à rugosidade do entorno; e a classe da edificação, de acordo com sua importância e tempo de vida útil. Também são informadas as características geométricas da estrutura, como a forma da cobertura, o comprimento, a largura, a altura da cumeeira e a inclinação do telhado.

Outros parâmetros de entrada incluem o fator topográfico, relacionado à conformação do terreno (plano, encosta ou cume), e os fatores estatístico e de forma, que consideram a variabilidade das rajadas e o tipo estrutural. O usuário também pode definir a direção de incidência do vento e optar pelos coeficientes aerodinâmicos sugeridos pela norma ou inserir valores personalizados, caso existam estudos específicos.

Como resultados, o VisualVentos fornece a pressão dinâmica de referência e as pressões de cálculo atuantes sobre cada face ou zona da estrutura, classificando-as conforme a NBR 6123 (ABNT, 2023). As pressões são apresentadas tanto em forma de tabelas quanto de diagramas, com valores de sucção ou compressão para cada área da cobertura.

## **2.4 Dimensionamento de estruturas metálicas de cobertura em arco segundo a NBR 8800 (ABNT,2024)**

A NBR 8800 (ABNT, 2024) fornece os critérios de dimensionamento de estruturas de aço para edificações, contemplando resistência à tração, compressão, flambagem e estabilidade global. Conforme Pfeil (2008), o dimensionamento de arcos deve considerar os efeitos secundários, especialmente em grandes vãos, e garantir verificações nos estados limites últimos e de serviço.

### **2.4.1 Propriedades do aço**

As propriedades do aço são essenciais, pois, tanto o projeto quanto a execução de uma estrutura metálica dependem delas. Dentre as principais propriedades, destacam-se a dureza e a ductilidade. A dureza refere-se à resistência do material ao risco ou abrasão, ou seja, à resistência que a superfície do aço oferece à penetração de um material mais duro. Essa característica é crucial na análise do aço durante as operações de estampagem de chapas. Já a ductilidade é a capacidade do aço de se deformar sob a ação de uma carga antes de sofrer ruptura (Ferraz, 2003).

As propriedades mecânicas do aço variam significativamente devido à incorporação de diferentes materiais em sua liga. Em razão disso, a NBR 8800 (ABNT, 2024) define as propriedades do aço como:

- Módulo de Elasticidade:  $E = 205 \text{ GPa}$ ;
- Módulo de Elasticidade Transversal:  $G = 77 \text{ GPa}$ ;
- Coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,3$ ;
- Coeficiente de dilatação térmica:  $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;
- Massa específica:  $7850 \text{ kg/m}^3$ ;
- Resistência a ruptura:  $f_u = 400 \text{ MPa}$ ;

- Resistência ao escoamento:  $f_y = 250$  MPa.

Os valores  $f_u = 400$  MPa e  $f_y = 250$  MPa correspondem a um aço estrutural de média resistência, compatível com materiais amplamente utilizados em perfis metálicos empregados em coberturas. Entretanto, a NBR 8800 (ABNT, 2024) ressalta que existem diversas classes de aço estrutural, cada uma com propriedades mecânicas específicas, recomendadas para diferentes tipos de perfis e solicitações, sendo representado na Figura 16.

**Figura 16: Aço especificados por Normas Técnicas para uso estrutural**

ABNT NBR 7007			ABNT NBR 6648			ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650		
Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural			Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono para uso estrutural		
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa
MR 250	250	400-560	CG-26	255	410	CF-26	260/280	400/410
AR 350	350	450	CG-28	275	440	CF-28	280/280	440/440
AR 350 COR	350	485				CF-30	—/300	—/490
AR 415	415	520						
ABNT NBR 5000			ABNT NBR 5004			ABNT NBR 5008		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa
G-30	300	415	F-32/Q-32	310	410	CGR 400	250	380
G-35	345	450	F-35/Q-35	340	450			
G-42	415	520	Q-40	380	480	CGR 500 e CGR 500A	370	490
G-45	450	550	Q-42	410	520			
			Q-45	450	550			
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921			ABNT NBR 8261					
Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural			Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais					
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	Seção circular		Seções quadrada e retangular		
				$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	
CFR 400	—/250	—/380	B	290	400	317	400	
CFR 500	310/370	450/490	C	317	427	345	427	

<sup>a</sup> Para limitações de espessura, ver a Norma correspondente indicada nesta Tabela.

**Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2024)**

#### 2.4.2 Levantamento de ações

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2024), é fundamental considerar todas as ações que possam ter um impacto significativo na estrutura. A norma NBR 8681–Ações e segurança nas estruturas – Procedimento (ABNT, 2025), que trata das ações e segurança nas estruturas, estabelece a classificação dessas ações em três categorias: permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes, conforme definido pela NBR 8681 (ABNT, 2025), são aquelas que ocorrem de forma constante ou com variações mínimas ao longo do tempo, permanecendo praticamente

inalteradas durante a vida útil da estrutura. Esses tipos de ações são essenciais para o projeto, pois garantem a estabilidade e a segurança ao longo dos anos.

- Ações permanentes indiretas: são aquelas que não resultam de cargas aplicadas diretamente, mas sim de condições impostas à estrutura, como recalques diferenciais de apoio, deformações iniciais, tensões residuais de fabricação ou efeitos térmicos permanentes;
- Ações permanentes diretas: incluem-se aqui os pesos próprios dos elementos estruturais, assim como o peso dos elementos de fechamento e vedação. Também são considerados os pesos dos equipamentos fixos instalados na edificação, além dos empuxos causados pelo peso das terras permanentes. Além disso, abrangem outras ações permanentes que possam ser aplicadas sobre a estrutura.

As ações variáveis, conforme a NBR 8681 (ABNT, 2025), são aquelas que sofrem variações ao longo da vida útil da edificação. Normalmente, essas ações são originadas pela ocupação do edifício, sobrecargas em pisos e coberturas, divisórias móveis, equipamentos, além de ações do vento e variações de temperatura. De acordo com a norma, as ações variáveis podem ser classificadas em normais ou especiais:

- Ações variáveis normais: São ações com alta probabilidade de ocorrer e com uma frequência significativa, sendo, portanto, levadas em conta no projeto das estruturas. Exemplos incluem ventos e sobrecargas devido a manutenções;
- Ações variáveis especiais: São ações que ocorrem de forma menos frequente, mas que devem ser consideradas no projeto, como as ações sísmicas.

### 2.4.3 Verificações

Em projetos de estruturas de aço, conforme a NBR 8800 (ABNT, 2024), os elementos devem ser dimensionados com base no Estado Limite Último (ELU) e, em seguida, verificados quanto aos Estados Limites de Serviço (ELS). A norma estabelece que nenhum desses estados-limite pode ser ultrapassado quando a estrutura estiver submetida a todas as combinações de ações previstas no projeto. Se

ao menos um desses limites for excedido, a estrutura será considerada inadequada para os objetivos para os quais foi projetada.

De acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2004), os projetos estruturais devem considerar o Estado Limite Último (ELU), que representa situações em que a estrutura pode deixar de cumprir sua função de forma segura. Isso inclui:

- Ruptura ou deformação excessiva dos materiais utilizados;
- Perda de equilíbrio, total ou parcial, da estrutura ou de seus elementos, mesmo que considerados como corpos rígidos;
- Instabilidade, seja por deformações excessivas ou por efeitos dinâmicos que levem à perda de equilíbrio;
- Transformação da estrutura em um sistema hipostático, tornando-a extremamente sensível a torções, grandes deformações ou colapsos, devido à presença de apoios simples apenas.

Já o Estado Limite de Serviço (ELS), segundo a NBR 8800 (ABNT, 2024), está relacionado ao desempenho da estrutura durante o uso normal. Ele garante que a estrutura permaneça funcional, com boa aparência, conforto para os usuários e durabilidade preservada. Nesse caso, são considerados aspectos como deformações excessivas que comprometam o uso, vibrações incômodas e danos localizados que prejudiquem a estética da edificação.

#### 2.4.4 Critérios de Dimensionamento e Equações de Verificação

A verificação da segurança dos elementos metálicos é realizada com base na comparação entre os esforços solicitantes atuantes e as respectivas resistências de cálculo, conforme a Equação 03:

$$S_d \leq R_d \quad (03)$$

Em que:

- $S_d$  representa a solicitação de cálculo (esforços);
- $R_d$  é a resistência de cálculo.

Os critérios e equações de verificação mais comuns no dimensionamento de estruturas de aço incluem os esforços solicitantes à tração e à compressão, flexão e cisalhamento.

#### 2.4.4.1 Tração simples

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2024), no item referente à tração simples, a resistência de cálculo de barras submetidas à tração deve ser avaliada considerando o escoamento da seção bruta. A norma define que o esforço axial resistente de cálculo à tração,  $N_{t,Rd}$ , é obtido pela Equação 04:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (04)$$

Onde:

- $N_{t,Rd}$ : esforço axial de tração de cálculo;
- $\gamma_{a1}$ : 1,10;
- $A_g$ : área bruta da seção transversal;
- $f_y$ : limite de escoamento do aço.

Essa verificação representa a capacidade resistente por escoamento sem considerar reduções por furos ou descontinuidades.

#### 2.4.4.2 Compressão simples

A resistência de cálculo de barras submetidas à compressão simples deve considerar os efeitos de instabilidade global da barra. A norma define que o esforço resistente em compressão,  $N_{c,Rd}$ , é dado pela Equação 05:

$$N_{c,Rd} = \frac{X A_{ef} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (05)$$

Onde  $X$  é o fator de redução por flambagem, determinado a partir da esbeltez da barra e das curvas de resistência.

Além disso, devem ser consideradas situações combinadas, como flexão com esforço normal (flexo-tração ou flexo-compressão), com as respectivas interações conforme os critérios da norma e também o cisalhamento.

No caso dos Estados Limites de Serviço (ELS), os critérios são mais voltados ao desempenho funcional.

## 2.5 Modelagem e análise estrutural no software Ftool

O software Ftool é amplamente reconhecido no meio acadêmico como uma ferramenta eficiente e intuitiva para análises estruturais baseadas no método da rigidez direta, sendo especialmente útil para sistemas estruturais constituídos por barras, como treliças, pórticos e vigas (MARTHA; NAKAO, 2000). Sua aplicação é adequada para estudos comparativos e análises preliminares de estruturas metálicas, permitindo avaliar rapidamente os efeitos dos carregamentos e da geometria no comportamento global da estrutura.

Diversos estudos nacionais e internacionais destacam que alterações na geometria e na inclinação de coberturas metálicas influenciam diretamente a distribuição das ações do vento e, conseqüentemente, os esforços e deslocamentos resultantes na estrutura. Blessmann (2001) demonstrou que coberturas arqueadas apresentam comportamento estrutural altamente sensível à variação da inclinação, especialmente sob condições de sucção e pressão definidas pela NBR 6123 (ABNT, 2023).

De forma semelhante, Savory et al. (2001) e Mooneghi e Kargarmoakhar (2016) evidenciaram que a forma geométrica da cobertura exerce influência significativa nos coeficientes de pressão do vento, alterando o desempenho global da estrutura. Além disso, Kopp et al. (2012) reforçam que coberturas curvas e outras configurações não convencionais exigem atenção específica, uma vez que pequenas variações de inclinação podem modificar substancialmente os padrões de escoamento e as cargas induzidas.

Nesse contexto, a utilização do Ftool neste trabalho permite compreender essas variações e fundamentar a avaliação técnica das diferentes inclinações da treliça metálica em arco.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de uma cobertura metálica em arco, submetida à ação do vento conforme os critérios estabelecidos pela NBR 6123 (ABNT, 2023), considerando diferentes inclinações da cobertura. O estudo toma como referência o ginásio de esportes Mario Nardi, localizado no município de Renascença – PR.

Trata-se de uma pesquisa de natureza mista, englobando tanto abordagens quantitativas quanto qualitativas. A vertente quantitativa está associada à análise numérica dos esforços atuantes e deformações estruturais obtidas por meio de modelagens computacionais e dimensionamentos normativos. Por sua vez, a abordagem qualitativa visa à compreensão contextual do objeto de estudo, permitindo uma avaliação mais abrangente sobre as condições reais da estrutura e os fatores que influenciam seu desempenho, conforme definido por Minayo (2024).

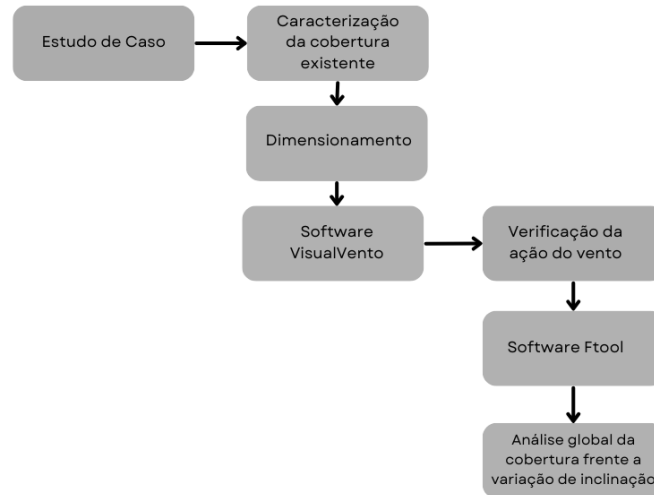
Quanto aos seus objetivos, esta pesquisa se classifica como exploratória, buscando proporcionar maior familiaridade com o problema e estabelecer uma base teórica e prática para análises futuras, conforme os conceitos de Gil (2002).

Ademais, a pesquisa adota a estratégia metodológica de estudo de caso, visto que se concentra na investigação de uma única edificação, o ginásio Mario Nardi, possibilitando uma análise detalhada das condições estruturais e das ações de vento sobre coberturas metálicas curvas. Essa estratégia é amplamente utilizada em ciências aplicadas por permitir um grau de detalhamento e contextualização que métodos generalistas não alcançam (GIL, 2002).

A pesquisa também se caracteriza como bibliográfica, fundamentando-se em materiais já publicados, tais como livros, artigos técnicos e científicos, dissertações, teses e normas técnicas. A pesquisa bibliográfica proporciona a construção do referencial teórico e a análise crítica de estudos anteriores sobre estruturas metálicas, ações do vento, inclinação de coberturas em arco e uso de ferramentas computacionais na modelagem e análise estrutural (Gil, 2002).

O desenvolvimento do trabalho seguiu os passos definidos no diagrama apresentado na Figura 17, iniciando com uma revisão bibliográfica sobre estruturas metálicas, incluindo normas técnicas, tipos usuais de coberturas, perfis metálicos, inclinações típicas e sistemas de ligação.

**Figura 17: Fluxograma**



**Fonte: Autoria própria, 2025**

O estudo de caso consiste na análise dos projetos arquitetônico e estrutural fornecidos pela Prefeitura Municipal de Renascença, a fim de caracterizar a cobertura existente e definir os parâmetros iniciais para modelagem. Com base nessas informações, realizou-se o dimensionamento da estrutura conforme os critérios normativos pertinentes, em especial as normas NBR 6123 (ABNT, 2023) e NBR 8800 (ABNT, 2024).

Para a análise computacional foram utilizados os softwares VisualVentos e Ftool. O VisualVentos foi empregado para verificar como o programa considera as ações do vento em estruturas metálicas curvas, enquanto o Ftool permitiu uma análise dos esforços internos e do comportamento global da estrutura frente às variações de inclinação da cobertura.

### **3.1 Apresentação da estrutura analisada**

A estrutura analisada refere-se a cobertura do Ginásio Municipal Mário Nardi, da cidade de Renascença – PR (Figura 18), com 34,95 m de largura e 49,95 m de comprimento, espaço compreendendo uma área de 1.590,02 m<sup>2</sup>.

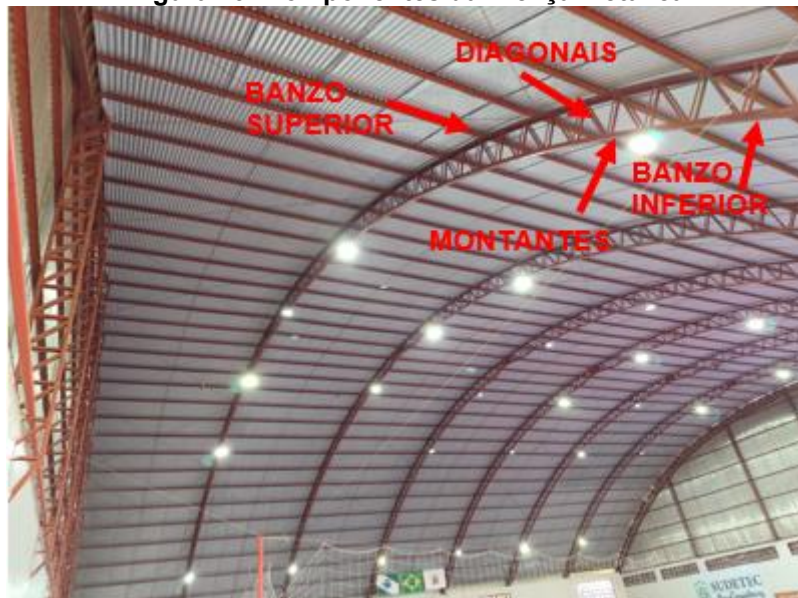
**Figura 18: Apresentação do Ginásio Mario Nardi**



Fonte: Autoria própria, 2025

A cobertura do Ginásio de Esportes é composta por treliças metálicas com perfis em U, que é um dos mais utilizados para esse tipo de obra. Na Figura 19, é possível verificar o sistema que compõe as treliças metálicas, sendo esses diagonais, montantes, banzo inferior e banzo superior.

**Figura 19: Componentes da Treliça Metálica**



Fonte: Autoria própria, 2025

O quadro 1 mostra as dimensões de cada elemento da treliça, que foram fornecidas pelo setor de engenharia da Prefeitura Municipal de Renascença, no dia em que foi realizada a visita ao local.

**Quadro 1: Medidas dos Perfis de cada componente**

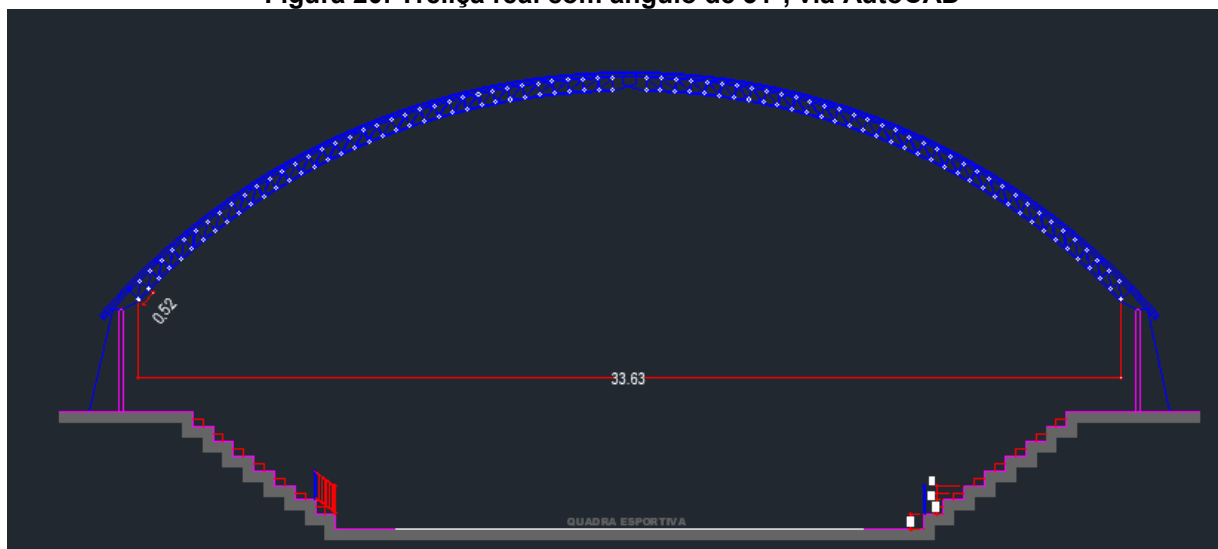
COMPONENTE	PERFIL	MEDIDAS (mm)
BANZO INFERIOR	U	100X40X2,65
BANZO SUPERIOR	U	100X40X2,65
MONTANTE	U	92X30X2,00
DIAGONAIS	U	92X30X2,00

Fonte: Autoria própria, 2025

Para a realização do trabalho foi considerado um apoio de primeiro gênero e também um de segundo gênero, tendo em vista que por ter um grande vão, apoios como esses promovem uma estabilidade global, solução essa que é recomendada pela NBR 8800 (ABNT, 2024).

A estrutura real do ginásio apresenta inclinação de treliça com  $31^\circ$ , sendo esta observada no projeto fornecido pela Prefeitura Municipal de Renascença, utilizando o software AutoCAD, (Figura 20).

**Figura 20: Treliça real com ângulo de  $31^\circ$ , via AutoCAD**



Fonte: Projeto disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Renascença, 2025

Com este projeto foi possível identificar que a treliça possui 33,63 metros de comprimento e que a distância entre montantes varia entre 0,48 m a 0,55 m.

Para efeitos de análise, foi modificada a inclinação da treliça, para  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  e  $50^\circ$ . Segundo Blessmann (2009), ângulos menores como  $20^\circ$  tendem a apresentar valores de sucção menores que ângulos maiores como  $40^\circ$  e  $50^\circ$ . Em ângulos maiores, o vento produz zonas de pressões e sucções altamente diferenciadas e mais intensas.

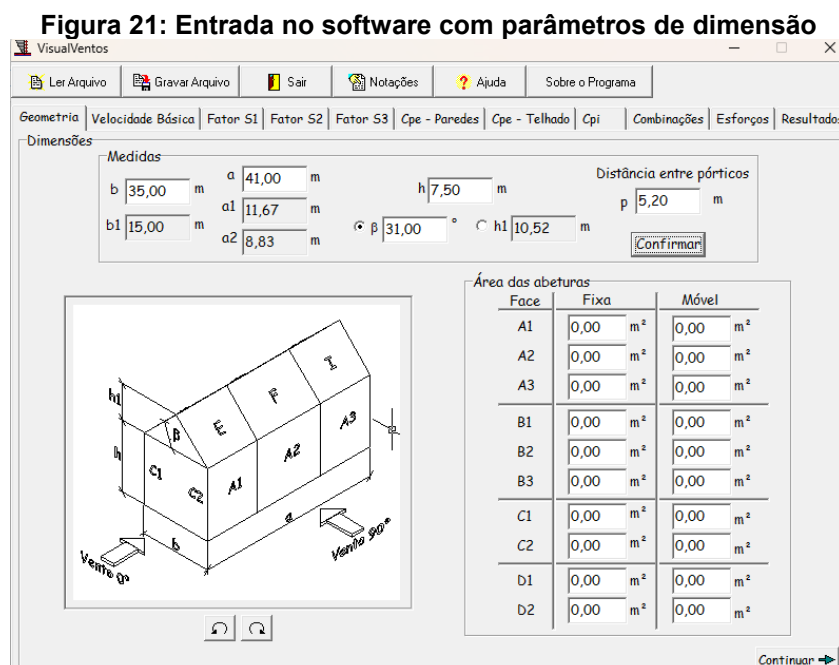
## 3.2 Dimensionamento

De acordo com os critérios normativos da NBR 8800 (ABNT, 2024), as condições de segurança das estruturas metálicas devem ser avaliadas de forma individualizada para cada reação.

### 3.2.1 Verificação da ação do vento

Para a verificação da ação do vento foi utilizado o software livre VisualVentos, disponibilizado pela Universidade Federal de Santa Maria. Desenvolvido para auxiliar na determinação das pressões de vento atuantes em edificações, de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 6123 (ABNT, 2023). Ele automatiza o processo de cálculo dos coeficientes e pressões, tornando a aplicação da norma mais ágil, precisa e menos suscetível a erros de interpretação ou cálculo manual.

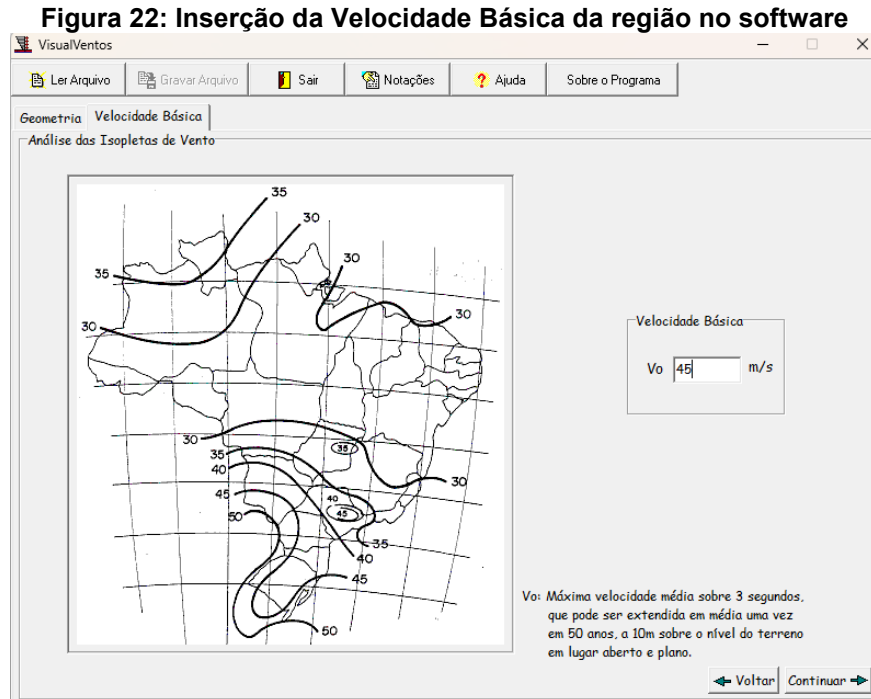
Inicialmente, os parâmetros da dimensão do ginásio foram inseridos no software, como largura, comprimento, altura, espaçamento entre arcos e o ângulo, como mostrado na Figura 21.



Fonte: Autoria própria, 2025

Esses parâmetros foram inseridos também para as outras inclinações, 20°, 40° e 50°, para que se consiga fazer a comparação entre as geometrias.

Posterior a isso, o software solicita a definição da velocidade básica do vento (Figura 22), a qual deve ser determinada conforme o mapa de isopletas apresentado na NBR 6123 (ABNT, 2023).



Fonte: Autoria própria, 2025

A velocidade básica da região se enquadra em 45 m/s, segundo o mapa das isopletas, sendo o mesmo parâmetro para todas as inclinações analisadas.

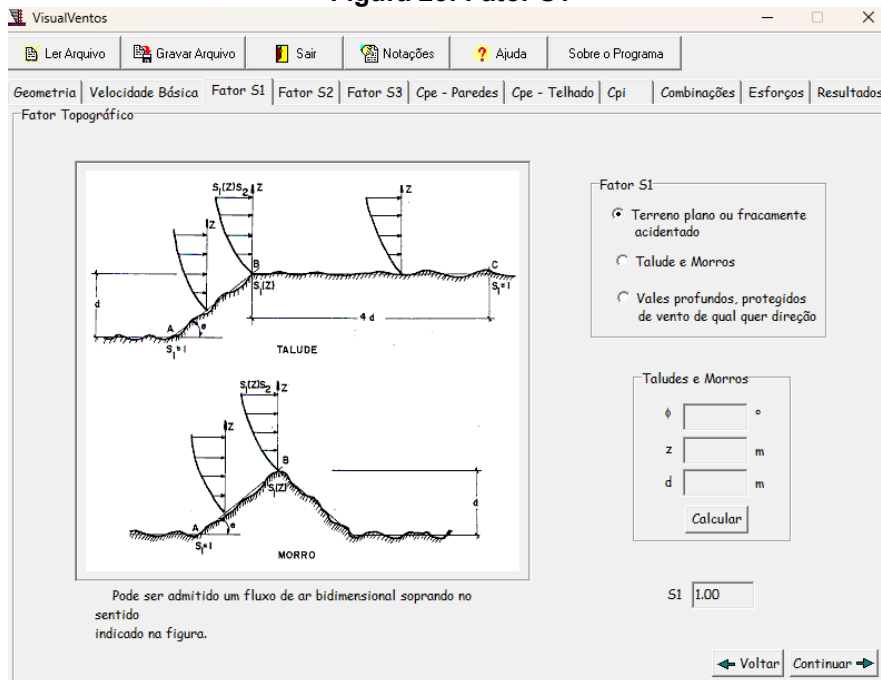
Após isso, foi definido o parâmetro S1 (Figura 23), o qual representa a influência da topografia do terreno na velocidade do vento, corrigindo o vento considerando se a edificação está em terreno plano, acive, encostas, morros ou topo de elevações.

Ao fazer a análise no local do estudo de caso, é constatado que o fator S1 a ser considerado para todas as inclinações é o referente a terreno plano ou fracamente acidentado.

Logo em seguida, seguindo a fórmula do vento característico, é definido o fator S2, que considera a rugosidade do terreno, ou seja, representa como o entorno da edificação influencia na velocidade do vento.

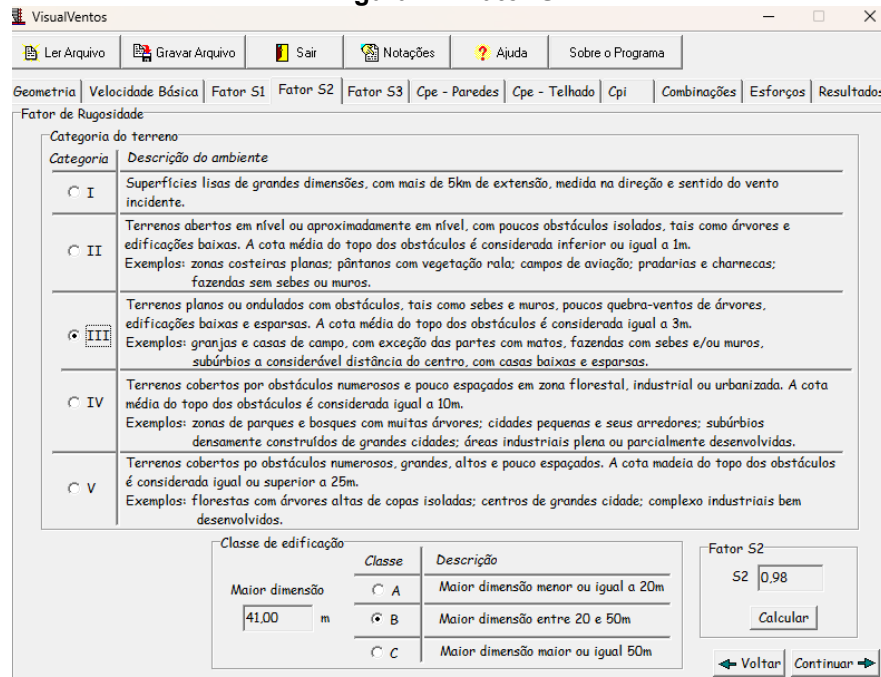
Para o local onde está inserida a edificação analisada, há a presença de algumas árvores nas imediações, residências baixas e, também, muros. Portanto, no software VisualVentos foi selecionado a categoria III, para as inclinações de 20°, 31°, 40° e 50° (Figura 24).

Figura 23: Fator S1



Fonte: Autoria própria, 2025

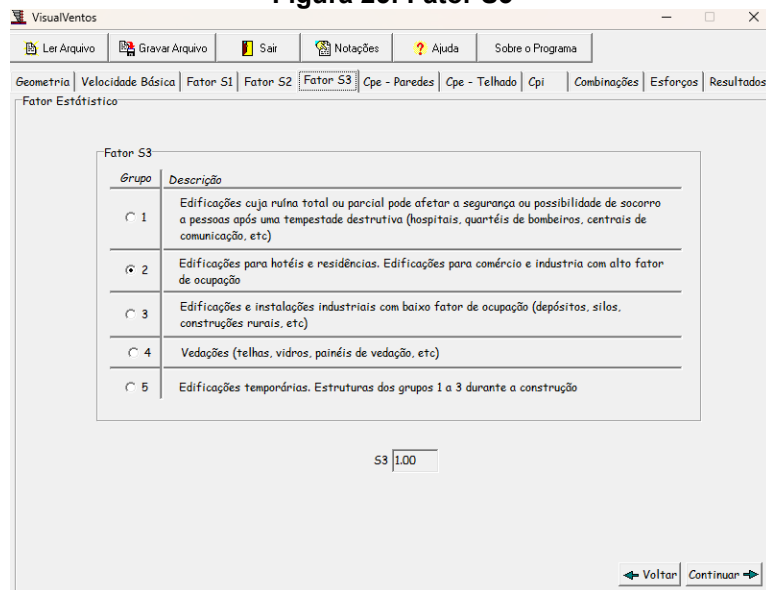
Figura 24: Fator S2



Fonte: Autoria própria, 2025

Também, é definido o valor do fator S3, que considera a vida útil da estrutura, bem como sua utilização. Para este estudo de caso, foi considerada a categoria II, (Figura 25).

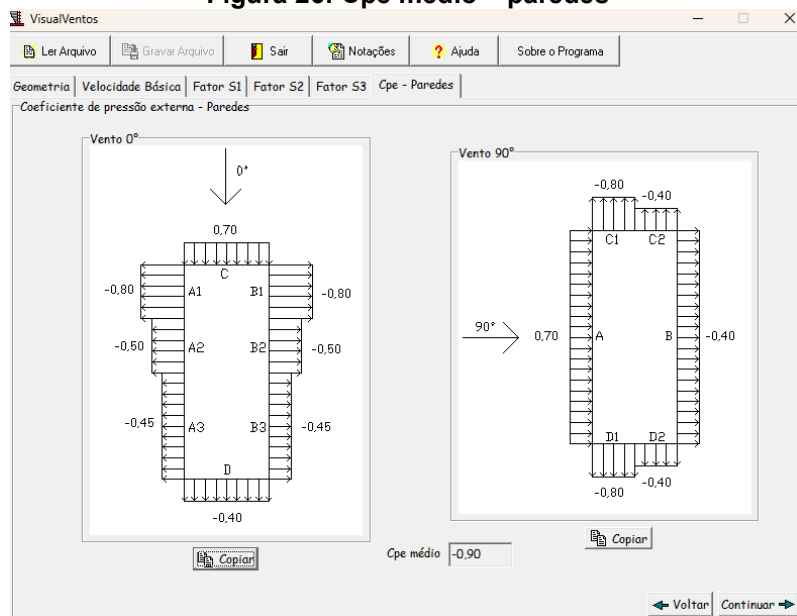
Figura 25: Fator S3



Fonte: Autoria própria, 2025

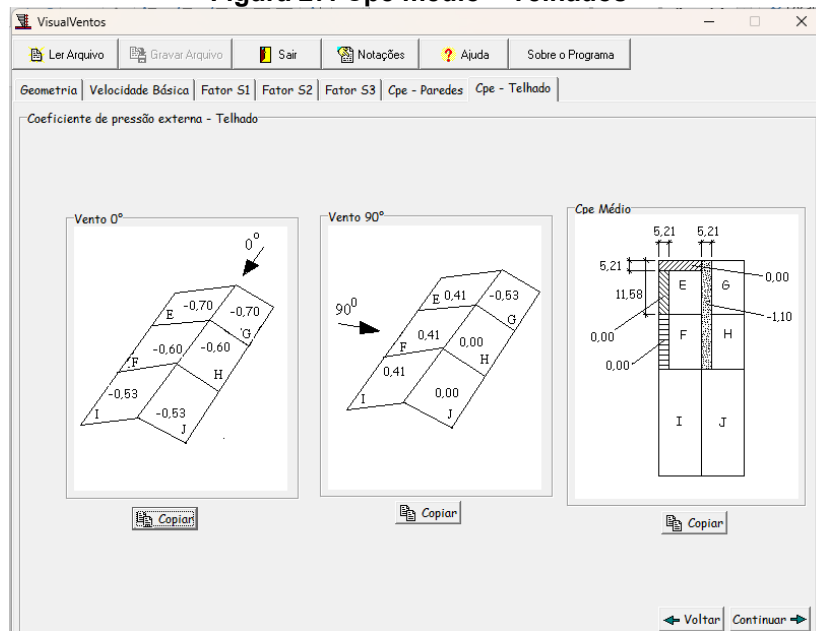
Com base nesses parâmetros adotados, o software calcula o coeficiente de pressão externa (Cpe) médio, que representa a pressão média exercida pelo vento sobre uma determinada área da superfície externa da edificação. Neste caso atuando nas paredes e internamente no beiral da estrutura de cobertura (Figura 26), e na parte superior do telhado, sendo este do tipo zincado (Figura 27).

Figura 26: Cpe médio – paredes



Fonte: Autoria própria, 2025

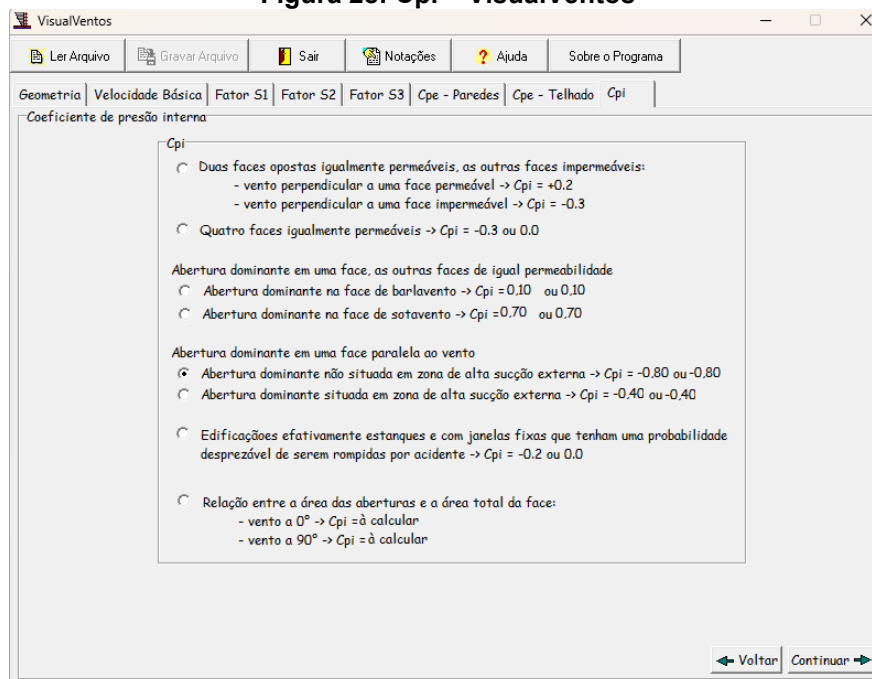
**Figura 27: Cpe médio – Telhados**



Fonte: Autoria própria, 2025

Dando continuidade, é definido o coeficiente de pressão interna, Cpi, para cada inclinação proposta, como mostra a Figura 28.

**Figura 28: Cpi – VisualVentos**



Fonte: Autoria própria, 2025

Com os dados inseridos, o software gerou gráficos, na aba de esforços e combinações, que representam a incidência do vento sobre a estrutura, podendo ser de sucção ou sobre-pressão.

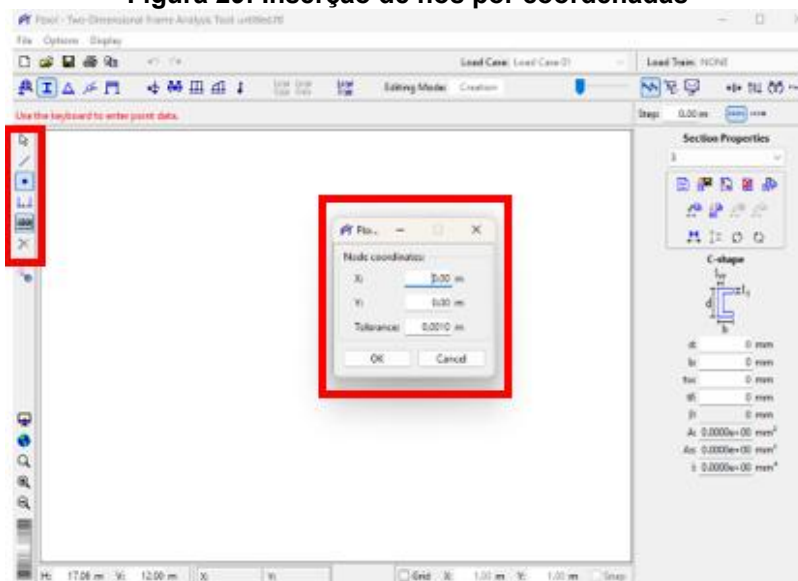
Por fim, o software gerou um relatório que pode ser exportado em extensão .txt para auxiliar na análise posterior, em conjunto com o software Ftool.

### 3.2.2 Análise dos esforços internos e deslocamentos

Neste trabalho, o Ftool foi empregado para analisar a treliça metálica em arco sob diferentes inclinações, possibilitando observar como a variação geométrica influencia a distribuição dos esforços e os deslocamentos estruturais resultantes. A análise foi conduzida com base nas normas brasileiras aplicáveis, em especial a NBR 8800 (ABNT, 2024), no que se refere às propriedades dos perfis metálicos, e a NBR 6123 (ABNT, 2023), referente à ação do vento.

A etapa inicial consistiu na modelagem da treliça no ambiente do Ftool. Para isso, os nós foram inseridos manualmente utilizando suas coordenadas reais, definidas conforme o vão, a altura e a inclinação da cobertura em arco adotada para cada configuração analisada. Em seguida, procedeu-se à ligação entre os nós por meio de barras (Insert Member), caracterizando cada segmento estrutural da treliça, (Figura 29).

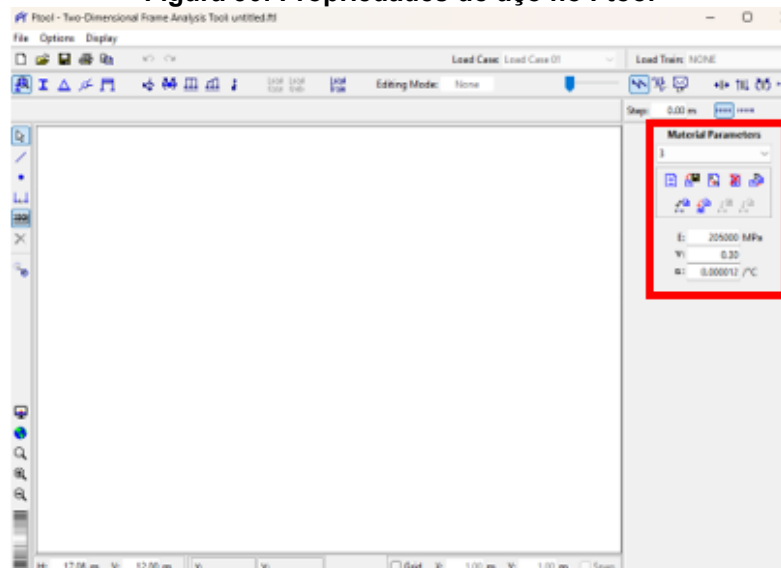
**Figura 29: Inserção de nós por coordenadas**



**Fonte: Autoria própria, 2025**

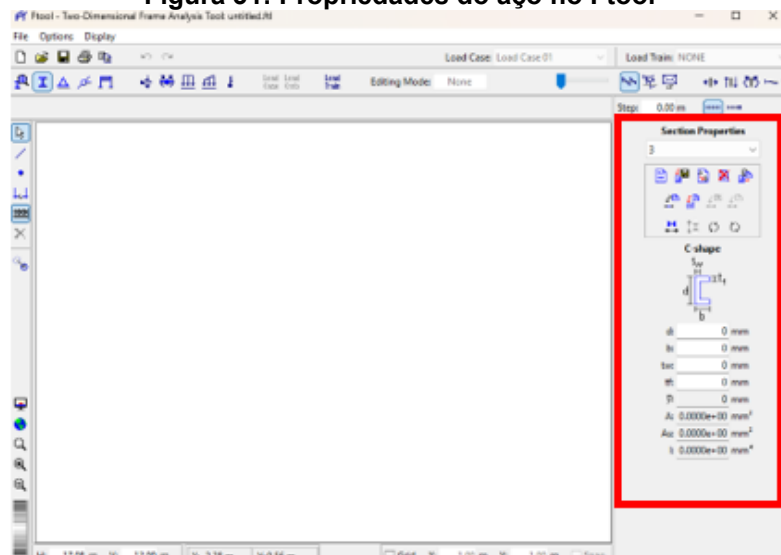
Posteriormente, foram definidas as propriedades mecânicas dos materiais e das barras, incluindo o módulo de elasticidade do aço estrutural, já mencionados no capítulo 2 (Figura 30) e as propriedades geométricas de cada perfil metálico (Figura 31), conforme especificado pela NBR 8800 (ABNT, 2024). Tais características foram atribuídas individualmente a cada barra utilizando o comando “Section Properties”.

**Figura 30: Propriedades do aço no Ftool**



Fonte: Autoria própria, 2025

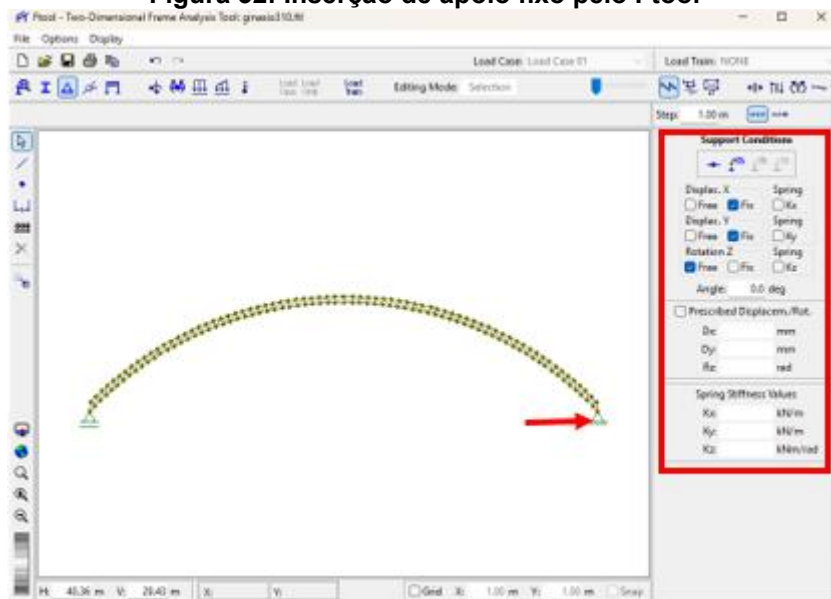
**Figura 31: Propriedades do aço no Ftool**



Fonte: Autoria própria, 2025

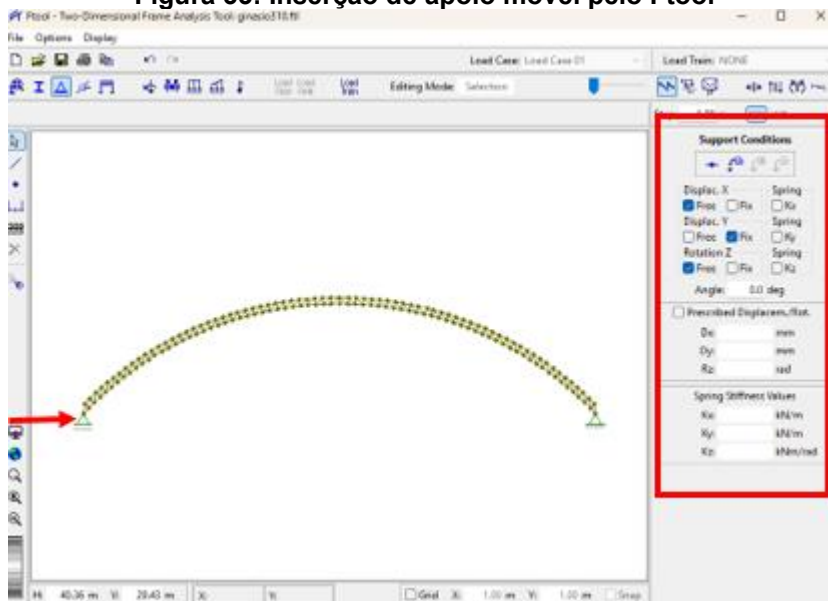
As condições de contorno foram aplicadas aos nós de apoio, representando o comportamento real da cobertura apoiada sobre pilares de concreto. Assim, foram impostas restrições de deslocamentos horizontais e verticais conforme o tipo de apoio adotado no projeto, sendo esse apoio fixo (Figura 32), no qual é travado na direção  $x$  e  $y$ , porém possui rotação livre, e também o apoio móvel (Figura 33), que somente é travado na direção  $y$ , possibilitando movimentos na direção  $x$  e também de rotação.

**Figura 32: Inserção de apoio fixo pelo Ftool**



Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 33: Inserção de apoio móvel pelo Ftool**



Fonte: Autoria própria, 2025

Em seguida, procedeu-se à inserção das ações atuantes na estrutura. As ações permanentes (peso próprio dos perfis metálicos e peso da cobertura) e as ações do vento obtidas conforme a NBR 6123 (ABNT, 2023) foram convertidas em forças nodais equivalentes, aplicadas diretamente nos nós correspondentes da treliça. Esse procedimento garante que a distribuição das cargas siga a discretização do modelo estrutural.

Após a configuração da geometria, propriedades, vínculos e carregamentos, realizou-se a análise estática linear, obtendo-se os resultados de esforço axial e deslocamentos nodais. Esses resultados serviram de base para avaliar o

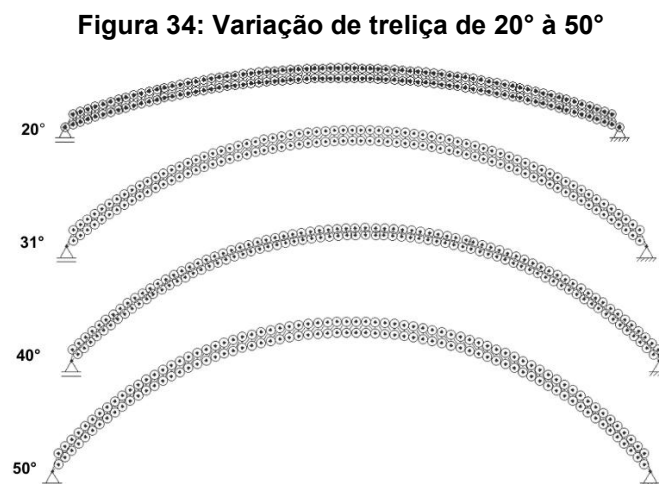
comportamento estrutural da treliça em cada inclinação estudada, permitindo identificar regiões mais solicitadas e compreender como a geometria influencia a eficiência estrutural da cobertura. A análise também fornece os valores de esforço cortante, momento fletor e reações de apoio, porém não foram foco deste trabalho.

### 3.2.3 Geometria

A geometria da treliça foi desenvolvida primeiramente no software AutoCAD, para facilitar a obtenção das inclinações desejadas e, também, a coleta das coordenadas espaciais. Posteriormente foi inserida no Ftool. Para realizar diferentes análises foram escolhidas quatro inclinações, 20°, 31°, 40° e 50°. Ressalta-se que a inclinação de 31° é a inclinação real da estrutura.

Em todas as inclinações foram mantidas as características do material escolhido, bem como seção, elementos, apoios, quantidade de nós e dimensões (largura e comprimento) da estrutura.

Tendo isso em vista, a Figura 34, representa a treliça variando da inclinação de 20° à de 50°, contendo um apoio fixo e um móvel em suas extremidades, 144 nós, sendo 72 nós banzo superior e 72 banzo inferior, 33,63 metros de vão, e comprimento de barras igual a 0,49 metros.



**Fonte: Autoria própria, 2025**

Com as treliças lançadas no software, é possível inserir os carregamentos e fazer as análises.

### 3.2.4 Carregamento

Os carregamentos aplicados à treliça foram inseridos no Ftool conforme os valores obtidos nas etapas de cálculo, aqueles provenientes da NBR 6123 (ABNT, 2023), que define os parâmetros necessários para determinação das ações do vento. Além do carregamento de vento, também foram considerados os carregamentos permanentes, incluindo peso próprio dos perfis metálicos e peso da cobertura.

Como o Ftool opera a partir do método da rigidez direta, todas as cargas distribuídas foram convertidas em forças nodais equivalentes, aplicadas diretamente nos nós correspondentes da treliça. A inserção dos carregamentos foi realizada utilizando o comando “Add Load”, onde cada força foi alocada considerando direção, intensidade e posição de aplicação.

Essa abordagem garante que a representação dos esforços atuantes esteja compatível com a discretização da estrutura, permitindo que o comportamento global da treliça seja analisado de forma coerente com as condições de carregamento.

### 3.2.5 Procedimentos de Análise

Com a geometria da treliça definida, as propriedades dos materiais atribuídas, os carregamentos inseridos e as condições de contorno estabelecidas, procedeu-se à execução da análise estrutural no Ftool. O software processou o modelo utilizando o método da rigidez direta, permitindo a obtenção dos esforços internos, deslocamentos nodais e reações de apoio para cada configuração de inclinação analisada.

A análise foi realizada de forma estática linear, adequada para estruturas treliçadas submetidas às ações permanentes e às cargas de vento convertidas em forças nodais equivalentes. Essa etapa permitiu verificar a coerência do modelo estrutural e garantir que o comportamento numérico represente adequadamente a treliça metálica estudada.

## 4 RESULTADOS

A análise estrutural da treliça metálica em arco permitiu observar de forma clara como a variação da inclinação influencia o comportamento da estrutura diante das ações permanentes e da ação do vento. As simulações realizadas no Ftool evidenciaram diferenças significativas na distribuição dos esforços internos, nos deslocamentos e nas reações de apoio, mostrando que pequenas alterações geométricas podem modificar o desempenho global da cobertura.

Os resultados obtidos para cada modelo revelam como os esforços axiais se concentram ao longo dos banzos, como os montantes e diagonais respondem ao fluxo das cargas e de que forma a treliça absorve e redistribui as pressões e sucções impostas pelo vento. Os deslocamentos também mostraram sensibilidade à mudança de inclinação, permitindo identificar configurações mais favoráveis em termos de rigidez e estabilidade.

A comparação entre as diferentes inclinações torna possível compreender quais geometrias apresentaram melhor eficiência estrutural, quais barras foram mais solicitadas e como a forma do arco influenciou diretamente o caminho das forças. Essa interpretação integrada dos esforços e deslocamentos fornece subsídios importantes para a verificação dos perfis metálicos e para a escolha da solução construtiva mais adequada para a cobertura.

### 4.1 Peso próprio

Na distribuição do peso próprio, os nós superiores receberam apenas a carga dos banzos superiores e os nós de baixo receberam as cargas dos montantes, das diagonais e dos banzos inferiores.

As terças estão posicionadas em cima dos montantes das treliças, sendo assim descarregadas apenas nos nós superiores. A influência de cada nó, que suporta a terça, é obtido através da área de influência, portanto sua carga pontual é obtida através da multiplicação do peso pela distância.

O peso do material das telhas foi definido conforme a Tabela 1 da NBR 8800 (ABNT, 2024) como sendo de  $0,14\text{kN/m}^2$ . A carga pontual desses elementos também

foi direcionada apenas aos nós superiores compreendendo a mesma área de influência do peso próprio.

**Quadro 2: Cargas permanentes da treliça**

Nó	Peso próprio (kgf)	Terça (kgf)	Telha (kgf/m)
1	1,903	0,00	101,52
2	2,782	0,00	101,52
3	2,782	7,73	101,52
4	2,782	0,00	101,52
5	2,782	0,00	101,52
6	2,782	7,73	101,52
7	2,782	0,00	101,52
8	2,782	0,00	101,52
9	2,782	7,73	101,52
10	2,782	0,00	101,52
11	2,782	0,00	101,52
12	2,782	7,73	101,52
13	2,782	0,00	101,52
14	2,782	0,00	101,52
15	2,782	7,73	101,52
16	2,782	0,00	101,52
17	2,782	0,00	101,52
18	2,782	7,73	101,52
19	2,782	0,00	101,52
20	2,782	0,00	101,52
21	2,782	7,73	101,52
22	2,782	0,00	101,52
23	2,782	0,00	101,52
24	2,782	7,73	101,52
25	2,782	0,00	101,52
26	2,782	0,00	101,52
27	2,782	7,73	101,52
28	2,782	0,00	101,52
29	2,782	0,00	101,52
30	2,782	7,73	101,52
31	2,782	0,00	101,52
32	2,782	0,00	101,52
33	2,782	7,73	101,52
34	2,782	0,00	101,52
35	3,351	0,00	101,52
36	2,782	7,73	101,52
37	2,782	0,00	101,52
38	2,782	0,00	101,52

39	2,782	7,73	101,52
40	2,782	0,00	101,52
41	2,782	0,00	101,52
42	2,782	7,73	101,52
43	2,782	0,00	101,52
44	2,782	0,00	101,52
45	2,782	7,73	101,52
46	2,782	0,00	101,52
47	2,782	0,00	101,52
48	2,782	7,73	101,52
49	2,782	0,00	101,52
50	2,782	0,00	101,52
51	2,782	7,73	101,52
52	2,782	0,00	101,52
53	2,782	0,00	101,52
54	2,782	7,73	101,52
55	2,782	0,00	101,52
56	2,782	0,00	101,52
57	2,782	7,73	101,52
58	2,782	0,00	101,52
59	2,782	0,00	101,52
60	2,782	7,73	101,52
61	2,782	0,00	101,52
62	2,782	0,00	101,52
63	2,782	7,73	101,52
64	2,782	0,00	101,52
65	2,782	0,00	101,52
66	2,782	7,73	101,52
67	2,782	0,00	101,52
68	2,782	0,00	101,52
69	2,782	7,73	101,52
70	2,782	0,00	101,52
71	2,782	0,00	101,52
72	1,903	0,00	101,52

Fonte: Autoria própria, 2025

## 4.2 Sobrecarga de manutenção

A sobrecarga de cobertura é uma ação variável definida pela NBR 6120 (ABNT, 2019), aplicada sobre elementos estruturais que compõem a cobertura de edificações, como treliças metálicas, terças e telhas. Essa carga tem como objetivo representar os esforços adicionais que podem ocorrer durante o uso normal da

edificação, como a presença eventual de pessoas para manutenção, equipamentos leves, acúmulo não intencional de materiais e outras situações transitórias.

Para coberturas metálicas, a NBR 6120 (ABNT, 2019) estabelece valores mínimos de sobrecarga que devem ser considerados no dimensionamento, independentemente da intensidade ou frequência de utilização. Isso garante que a estrutura possua um nível adequado de segurança frente às ações que não são permanentes, mas que podem ocorrer em algum momento da vida útil do edifício.

No presente estudo, foi adotado o valor de sobrecarga característica igual ao obtido através item 6.4 da NBR 6120 (ABNT, 2019), em que para inclinações superiores a 3%, deve ser considerado  $\alpha = 0,50$ , sendo este multiplicado na Equação 06 e posteriormente multiplicado pelo vão entre as treliças de 5,24 metros:

$$q = 0,50 \cdot \alpha \cdot 5,24 \quad (06)$$

Neste caso resultando em um valor de 1,31 kN/m<sup>2</sup>.

### 4.3 Ações do vento

Com os dados obtidos no software VisualVentos, foi possível calcular a ação do vento da edificação em estudo.

O ponto de partida do cálculo foi a velocidade básica da região, ajustada pelos fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , representando respectivamente as condições topográficas, características do entorno e nível de segurança da edificação (Quadro 3). Esses fatores foram inseridos no Visual Ventos e validados com os critérios da NBR 6123 (ABNT, 2023).

**Quadro 3: Fatores S1,S2 e S3 para cada inclinação, via VisualVentos**

INCLINAÇÃO	FATOR S1	FATOR S2	FATOR S3
20°	1,00	0,95	1,00
31°	1,00	0,98	1,00
40°	1,00	1,00	1,00
50°	1,00	1,03	1,00

Fonte: Autoria própria, 2025

Após a definição desses fatores é possível calcular a velocidade característica, para cada inclinação e, também, a pressão dinâmica. Resultados estes que serão apresentados no Quadro 4, a seguir.

**Quadro 4: Velocidade Característica e Pressão dinâmica**

	S1	S2	S3	Vk (m/s)	q kn/m <sup>2</sup>
20°	1	0,95	1	42,75	1,120296
31°	1	0,98	1	44,1	1,192169
40°	1	1	1	45	1,241325
50°	1	1,03	1	46,35	1,316922

Fonte: Autoria própria, 2025

Um aspecto importante considerado na análise é que a pressão do vento varia com a inclinação da cobertura. Coberturas mais inclinadas tendem a apresentar maior efeito de sucção, pois a componente tangencial do vento aumenta sobre a superfície. Já inclinações mais baixas reduzem essa sucção e podem até gerar regiões de pressão positiva.

Com o valor da pressão dinâmica estabelecido, é possível dar sequência e descobrir os coeficientes de pressão externa (Quadro 5), e interna que pode ser calculada a partir da área das aberturas, no entanto, foi utilizado nesse caso o  $C_{pi} = -0,80$ , que significa que não há abertura situada em zona de alta sucção.

**Quadro 5: Coeficientes de pressão externa**

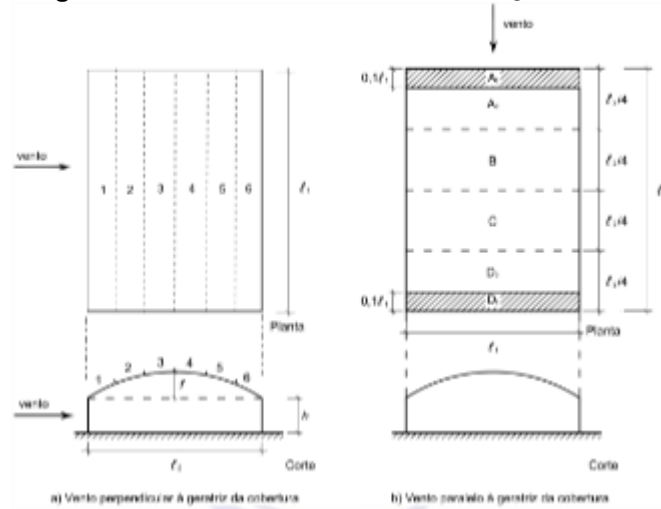
INCLINAÇÃO	Vento 0°	Cpe - Telhado			Vento 90°	Cpe - Telhado	
		EG	FH	IJ		EFI	GHJ
20°		-0,7	-0,6	-0,53		-0,4	-0,4
31°		-0,7	-0,6	-0,53		-0,02	-0,41
40°		-0,7	-0,6	-0,53		0,2	-0,47
50°		-0,7	-0,6	-0,53		0,43	-0,53 e -0,47

Fonte: Autoria própria, 2025

Porém, ao observar como o software VisualVentos estava considerando o tipo de telhado, foi percebido que, não representava o modelo de treliça e de estrutura analisada, visto que a geometria que o software utiliza, é uma geometria simples, retangular de duas águas, diferente da do estudo caso, em arco.

Portanto, foi utilizado como referência para cálculo de coeficiente externo e de coeficiente interno, o item 6.2.3 da NBR 6123 (ABNT, 2023) no qual traz os coeficientes de pressão externa para coberturas curvas: abóbodas cilíndricas de seção circular, como representado na Figura 35.

**Figura 35: Abóbodas cilíndricas de seção circular**



**Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023)**

Partindo desta figura, algumas relações foram feitas para que se chegasse no resultado dos coeficientes de pressão externa pela Tabela 15 da NBR 6123 (ABNT, 2023), sendo estes representados no Quadro 6, a seguir.

**Quadro 6: Relação de medidas**

INCLINAÇÃO	f	L2	h	f/L2	h/L2
20°	4,31	34,75	3,5	0,124029	0,100719
31°	7,11	34,75	3,5	0,204604	0,100719
40°	9,9	34,75	3,5	0,284892	0,100719
50°	13,1	34,75	3,5	0,376978	0,100719

**Fonte: Autoria própria, 2025**

Com essas relações obtidas, foi conseguido os coeficientes de pressão externa como mostrado na Figura 36, a partir da Tabela 15 da NBR 6123 (ABNT, 2023).

**Figura 36: Coeficiente de pressão externa,  $c_{pe}$ , para vento soprando perpendicularmente a geratriz da estrutura**

$f/l_2$	$h/l_2$	$c_{pe}$ para a parte					
		1	2	3	4	5	6
1/5	0	+0,3	-0,3	-0,6	-0,7	-0,6	-0,2
	1/8	-0,5	-0,5	-0,7	-0,7	-0,5	-0,2
	1/4	-0,9	-0,6	-0,8	-0,8	-0,4	-0,2
	1/2	-1,2	-0,7	-0,9	-0,8	-0,3	-0,2
	1	-1,4	-0,8	-0,9	-0,9	-0,4	-0,4
	5	-1,8	-1,0	-1,1	-1,2	-0,8	-0,7
1/10	1/8	-1,0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
	1/4	-1,2	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
	1/2	-1,5	-1,0	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3
	1	-1,6	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3

NOTA Ver a Figura 7-a.

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023)

Através das relações obtidas no Quadro 6, a análise da tabela mencionada, se dá na faixa em que  $f/L_2$  é igual a 1/10.

Sabendo disso, foi possível descobrir os coeficientes de pressão externa para cada inclinação (Quadro 7). Lembrando que para alguns resultados, foi necessário fazer interpolação, para que se chegasse em um valor mais condizente.

**Quadro 7:  $c_{pe}$  de cada faixa, para cada inclinação**

INCLINAÇÃO	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5	Faixa 6
20°	-1,00	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,30
31°	-1,13	-0,46	-0,40	-0,40	-0,40	-0,30
40°	-1,24	-0,56	-0,44	-0,41	-0,40	-0,30
50°	-1,35	-0,75	-0,55	-0,45	-0,40	-0,30

Fonte: Autoria própria, 2025

Para o vento paralelo a geratriz, deve ser calculado os valores de  $A_1, A_2, B, C, D_2$  e  $D_1$ .

Dessa maneira, temos que para  $A_1$  e  $D_1$ , multiplicar 0,1 pela dimensão  $L_1$  especificada na normatiza. Sendo  $L_1 = 34,75$  m.

$$A_1 = D_1 = 0,1 \times L_1$$

$$A_1 = D_1 = 0,1 \times 34,75$$

Com isso, obteve-se:

$$A_1 = D_1 = 3,475$$

Para descobrir  $A_2, B, C$  e  $D_2$ , basta relacionar o comprimento da cobertura, pela quantidade de faixas restantes. Neste caso:

$$A_2 = B = C = D_2 = L_2/4$$

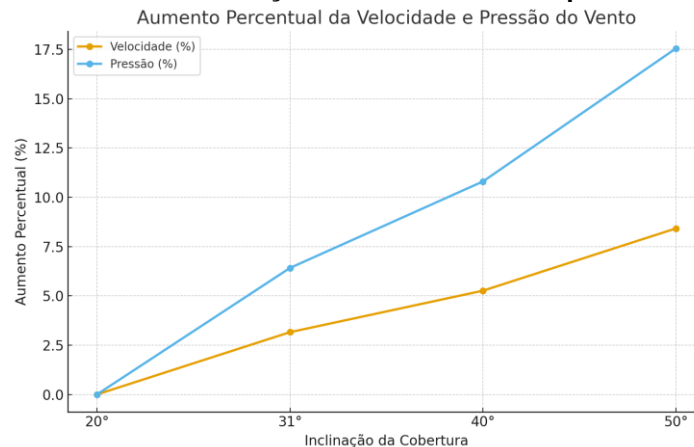
$$A_2 = B = C = D_2 = 49,95/4$$

$$A_2 = B = C = D_2 = 12,5$$

A análise evidencia que o aumento da inclinação do telhado está diretamente associado ao crescimento dos valores de sucção provocados pela ação do vento. Em coberturas com a inclinação maior, a sucção não apenas atinge maiores intensidades, mas também se mantém elevada por uma região mais extensa da superfície antes de diminuir. Esse comportamento está relacionado à forma como o escoamento do ar interage com superfícies inclinadas, intensificando os gradientes de pressão.

Observa-se que o aumento da inclinação da cobertura impacta diretamente os valores de velocidade e pressão do vento. Em comparação ao ângulo de 20°, a velocidade do vento cresce até 8,42% na inclinação de 50°, enquanto a pressão apresenta aumento ainda mais significativo, chegando a 17,57%, conforme apresentado na Figura 37.

**Figura 37: Gráfico da variação da velocidade e da pressão do vento**



Fonte: Autoria própria (2025)

Esses resultados reforçam que geometrias mais inclinadas tendem a alterar de forma expressiva os efeitos aerodinâmicos atuantes na cobertura.

#### 4.4 Combinação das ações

A análise estrutural da treliça metálica em arco exige que todas as ações atuantes sejam combinadas de acordo com os critérios da NBR 8681 (ABNT, 2025), que estabelece as regras gerais para combinações de ações em Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS). Nesse estudo, foram consideradas como ações permanentes o peso próprio da treliça, das terças e da telha metálica, calculados conforme a NBR 6120 (ABNT, 2020) assim como a sobrecarga, e como ação variável o vento, determinado pela NBR 6123 (ABNT, 2023).

$$F_d = \sum \gamma_g \cdot F_{g,k} + \gamma_q \cdot F_{q1,k} + \sum \gamma_q \varphi_0 \cdot F_{q,k}$$

Sendo,

$F_{g,k}$  = Valor característico de ações permanentes

$F_{q1,k}$  = Valor característico da ação variável principal

$F_{q,k}$  = Valor característicos das demais ações variáveis

$\gamma_g$  e  $\gamma_q$  = Fatores de ponderação de ações permanentes e variáveis

$\varphi_0$  = Fator de combinação das ações

Foram realizadas duas combinações tanto para o estado-limite último quanto para o estado-limite de serviço. Sendo considerado a primeira combinação para ELU a carga de vento com o peso próprio e a segunda combinação considerando a sobrecarga com o peso próprio. Porém, vale ressaltar que essas combinações variam conforme a inclinação. Para melhor visualização, as combinações estão no Anexo A.

Para as combinações foram utilizados os fatores de ponderação da Tabela 1, disponibilizados na NBR 8800 (ABNT, 2024), conforme apresentado na Figura 38.

**Figura 38: Valores dos coeficientes de ponderação**

Combinações	Ações permanentes ( $\gamma_g$ ) <sup>a, f</sup>						
	Diretas, consideradas separadamente					Diretas agrupadas <sup>b</sup>	Indiretas
	Peso próprio de estruturas de aço e de equipamentos	Peso próprio de estruturas pré-moldadas, de madeira e de elementos construtivos industrializados	Peso próprio de estruturas moldadas in loco e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco	Peso próprio de elementos construtivos em geral		
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,35 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,25 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	1,15 (1,00)	0 (0)
Combinações	Ações variáveis ( $\gamma_q$ ) <sup>a, f</sup>						
	Consideradas separadamente					Agrupadas <sup>c</sup>	
	Efeito da temperatura		Ação do vento	Ações truncadas <sup>d</sup>	Demais ações variáveis		
Devido à variação térmica da atmosfera	Gerada por equipamentos <sup>e</sup>						
Normais	1,20	1,50	1,40	1,20	1,50	1,50	
Especiais ou de construção	1,00	1,30	1,20	1,10	1,30	1,30	
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

<sup>a</sup> Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não podem ser incluídas nas combinações.

<sup>b</sup> As ações permanentes diretas podem ser todas agrupadas com os coeficientes apresentados nesta coluna, em função do tipo de combinação.

<sup>c</sup> As ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem ser todas agrupadas com os coeficientes apresentados nesta coluna, em função do tipo de combinação (o efeito da temperatura devido à variação térmica da atmosfera pode ser considerado isoladamente, com seu próprio coeficiente de ponderação).

<sup>d</sup> Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

<sup>e</sup> O efeito da temperatura gerada por equipamentos deve ser considerado ação causada pelo uso e ocupação.

<sup>f</sup> No caso de equipamentos (móveis ou fixos) que suportam ou íçam cargas, o peso próprio do equipamento deve ser considerado como ação permanente e a carga suportada ou íçada, como ação variável.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2024)

Já para o cálculo do estado limite de serviço, foram utilizados os valores de combinação e de redução apresentados na Tabela 2 da NBR 8800 (ABNT, 2024), conforme indicado na Figura 39. Como as combinações foram realizadas

separadamente, visto que a sobrecarga tem um efeito contrário a ação do vento na estrutura, o fator multiplicador é igual a 1,00.

**Figura 39: Valores de combinação e de redução para ações variáveis**

Ações		$\gamma_{fz}^{a,f}$		
		$\psi_0$	$\psi_1^b$	$\psi_2^e$
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação <sup>g</sup>	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>b</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>c</sup>	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas, garagens e coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4

<sup>a</sup> Ver 4.8.5.3-c).  
<sup>b</sup> Edificações residenciais de acesso restrito.  
<sup>c</sup> Edificações industriais, comerciais, de escritórios e de acesso ao público.  
<sup>d</sup> Para estado-limite de fadiga (ver o Anexo H), usar  $\psi_1$  igual a 1,0.  
<sup>e</sup> Para combinações excepcionais em que a ação principal for sismo, admite-se adotar para  $\psi_2$  o valor zero.  
<sup>f</sup> Para ações truncadas, adotar  $\psi_0 = \psi_1 = \psi_2 = 1,0$   
<sup>g</sup> Inclui o efeito da temperatura gerado por equipamentos

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2024)

## 4.5 Verificação de dimensionamento

O dimensionamento dos elementos tracionados e comprimidos da treliça metálica foi realizado conforme os critérios estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2024), utilizando-se, para cada barra, as propriedades geométricas dos perfis estruturais empregados e os coeficientes de resistência prescritos pela norma. Para todos os cálculos foi adotado módulo de elasticidade do aço de  $E = 205.000$  MPa, tensão de escoamento  $f_y = 250$  MPa ( $25$  kN/cm<sup>2</sup>) e tensão última  $f_u = 400$  MPa ( $40$  kN/cm<sup>2</sup>), valores compatíveis com o aço estrutural típico empregado em treliças de coberturas.

### 4.5.1 Verificação à tração – Seção bruta

Para barras tracionadas, a resistência última à tração por escoamento é determinada de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2024).

$$N_t, R_d = (A_g * f_y) / \gamma_{a1}$$

Sendo,

$A_g$  = Área bruta;

$f_y$  = Tensão de escoamento;

$\gamma_{a1} = 1,10$

- Para banzos, com área bruta de  $4,63 \text{ cm}^2$ , perfil U 100x40x2,65mm.

$$N_{t,Rd} = (4,63 * 25) / 1,10$$

$$N_{t,Rd} = 105,23 \text{ kN}$$

- Para diagonais e montantes, com área bruta de  $2,96 \text{ cm}^2$ , perfil U 92x30x2,00mm.

$$N_{t,Rd} = (2,96 * 25) / 1,10$$

$$N_{t,Rd} = 67,27 \text{ kN}$$

Esses valores representam a capacidade resistente ao escoamento sem considerar possíveis reduções por descontinuidades.

#### 4.5.2 Verificação à tração – Seção líquida

Nos elementos tracionados, a resistência à ruptura da seção líquida deve seguir o disposto na NBR 8800 (ABNT, 2024), a qual estabelece que a área líquida efetiva depende da existência de furos para ligações ou de regiões onde a transmissão de esforços não ocorre por toda a largura da barra. De acordo com o item referente à determinação da área líquida, a norma deixa claro que o desconto de área só é necessário quando houver furos de parafusos, dada a diminuição real da seção resistente.

Portanto, como não há furos ou mecanismos que interrompam a continuidade da seção, não há necessidade de determinar a área líquida efetiva, e a verificação pode ser conduzida diretamente com a área bruta da barra.

#### 4.5.3 Verificação à compressão – Banzos, diagonais e montantes

A definição do eixo de verificação à compressão segue o critério da ABNT NBR 8800, que determina que a análise deve ser feita no eixo onde a barra apresenta maior tendência à flambagem. Para o perfil U utilizado, as propriedades geométricas indicam que o eixo y possui menor raio de giração e, portanto, menor rigidez à flexão nessa direção. Isso torna a flambagem mais provável em torno do eixo y. Assim, a

verificação à compressão foi realizada considerando esse eixo, por representar a condição mais crítica de instabilidade para a barra.

- Banzos

$$N_{r,k} = 4,63 * 25$$

$$N_{r,k} = 115,75 \text{ Kn}$$

Fórmula de Euler:

$$N_{ex} = (\pi^2 * E * I_x) / (KL)^2$$

$$N_{ey} = (\pi^2 * E * I_y) / (KL)^2$$

$$N_{ex} = 5584,22 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = 554,38 \text{ Kn}$$

Portanto  $N_e = 554,38 \text{ Kn}$ .

Com isso é calculado a esbeltez global:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{N_{r,k}}{N_e}} = 0,46$$

$$\chi = 0,94$$

Assim a resistência a compressão é:

$$N_{c,rd} = 0,94 * 105,23 = 98,61 \text{ kN}$$

Diagonais e Montantes:

$$N_{r,k} = 2,96 * 25 = 74,00 \text{ kN}$$

$$N_{ex} = 721,50 \text{ Kn}$$

$$N_{ey} = 46,54 \text{ kN}$$

$$N_e = 46,54 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{N_{r,k}}{N_e}} = 1,24$$

$$\chi = 0,53$$

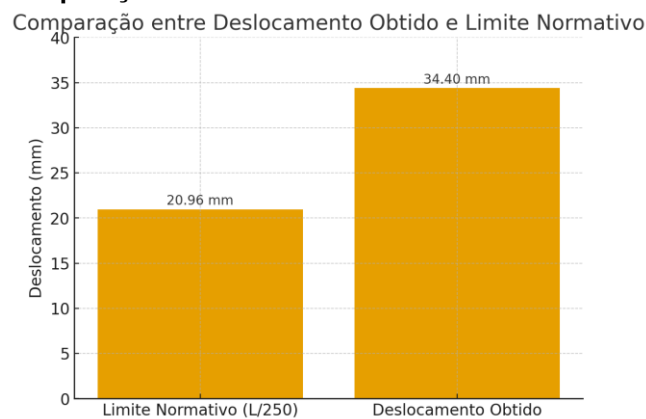
$$N_{c,rd} = 0,53 * 67,27 = 35,64 \text{ kN}$$

Para a avaliação do Estado Limite de Serviço das terças de cobertura, considerou-se uma viga metálica tipo U 75×40×15×2,25 mm, simplesmente apoiada entre as treliças, com vão igual a 5,24 m. A carga permanente atuante foi composta pelo peso próprio da terça, peso da telha e demais permanentes, totalizando aproximadamente 1,40 kN/m.

O deslocamento máximo foi calculado utilizando a formulação clássica de viga biapoiada submetida a carregamento distribuído, resultando em aproximadamente 34,4 mm.

De acordo com a Tabela B.1 da NBR 8800 (ABNT, 2024), o deslocamento máximo admissível para terças de cobertura é  $L/250$ , o que corresponde a 20,96 mm para o vão considerado. Comparando-se os valores, verifica-se que o deslocamento obtido é cerca de 64% superior ao limite normativo, como representado na Figura 40.

**Figura 40: Comparação entre deslocamento máximo e deslocamento real**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Neste caso, observa-se que o Estado Limite de Serviço não é atendido.

#### 4.5.4 Comportamento dos esforços

A análise das combinações de ações revelou um comportamento estrutural consistente para todas as inclinações avaliadas. As combinações de ELU envolvendo peso próprio + vento resultaram predominantemente em esforços de tração, enquanto as combinações de peso próprio + sobrecarga produziram esforços de compressão nas barras da treliça. Esse padrão é coerente com o comportamento típico de coberturas em arco, onde a sobrecarga atua verticalmente sobre o intradorso, comprimindo a estrutura, enquanto a sucção do vento no extradorso tende a tracionar os elementos.

Os valores obtidos confirmam essa tendência:

- Inclinação de 20°: Trações entre 0,352 kN e 0,385 kN; compressões entre 2,596 kN e 2,893 kN.

- Inclinação de 31°: Trações entre 0,288 kN e 0,377 kN; compressões entre 1,898 kN e 2,753 kN.
- Inclinação de 40°: Trações próximas de 0,344 kN e 0,542 kN; compressão acima de 4,092 kN.
- Inclinação de 50°: Trações entre 0,238 kN e 0,324 kN; compressões em torno de 2,718 kN.

Esses resultados se alinham com as observações experimentais de Blessmann, que indicam que coberturas com maiores inclinações apresentam sucções mais intensas, reforçando a predominância de esforços de tração sob ação do vento.

## 5 CONCLUSÃO

A análise mostrou que a inclinação da cobertura influencia significativamente o comportamento estrutural da treliça, especialmente frente ao vento, cuja pressão variou 8,42% e a velocidade 17,57%. No Estado Limite de Serviço, os deslocamentos ultrapassaram em cerca de 64% o limite da NBR 8800 (ABNT, 2024), indicando falta de rigidez nos perfis adotados.

Nas verificações de resistência, apenas os montantes atenderam aos esforços de compressão e tração. Os banzos superiores resistiram apenas à tração, e os banzos inferiores e diagonais não atenderam a nenhum dos casos. Isso mostra que os perfis utilizados não possuem capacidade suficiente para suportar as ações, especialmente em maiores inclinações.

Conclui-se que, com os perfis adotados, a estrutura não atende aos estados limites de serviço e resistência. Entretanto, ajustes como uso de perfis mais robustos, maior espessura ou revisão das ligações podem garantir um desempenho adequado. Estudos futuros podem avaliar alternativas de perfis, geometrias e influências das ligações e pilares no comportamento global.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023/2018:** informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Acesso em: 20 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123/2023:** forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. Acesso em: 20 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681/2025:** ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. Acesso em: 20 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800/2024:** projetos de estrutura de aço e concreto de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. Acesso em: 20 abr. 2025.

BLESSMANN, J. **Acidentes Causados Pelo Vento**. Porto Alegre, Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 144 p. Acesso em: 20 abr. 2025.

BLESSMANN, J. **Ação do Vento em Telhados**. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 368 p. Acesso em: 20 abr. 2025.

BRASIL. CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **A Evolução da Construção em Aço no Brasil**. 2015. Disponível em: < <https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/> >. Acesso em: 15 maio 2025.

CHWEDLER, M. **Estruturas metálicas: dimensionamento prático**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2009. Acesso em: 02 jun. 2025.

GAZETA DO POVO. **Onde mais venta no Paraná? Gazeta do Povo**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/especiais/retratos-parana/curiosidades/onde-mais-venta-no-parana-6z3mp38vapvb6gw4cbyix3x3i/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. Acesso em: 16 maio 2025.

G1 PARANÁ. **Tornado em Rio Bonito do Iguazu destruiu cerca de 80% da cidade, diz governo; “cenário de guerra”**. Curitiba, 8 nov. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/campos-gerais-sul/noticia/2025/11/08/tornado-em-rio-bonito-do-iguacu-destruiu-cerca-de-80percent-da-cidade-diz-governo-cenario-de-guerra.ghtml>. Acesso em: 27 nov. 2025.

HIBBELER, R. C. **Engenharia Estrutural – Princípios e Aplicações**. São Paulo: Pearson, 2016. Acesso em: 13 jul. 2025.

KOPP, G. A.; FARQUHAR, S.; MORRIS, B. **The aerodynamics of roofs: A review.** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012. Acesso em: 10 out. 2025.

MARTHA, Luiz Fernando; NAKAO, Osvaldo Shigueru. **Manual do FTOOL: two-dimensional frame analysis tool.** São Paulo: EPUSP/PEF, 2000. Disponível em: repositório da USP. Acesso em 27 nov. 2025.

MOONEGHI, M. A.; KARGARMOAKHAR, R. **Wind flow and pressure on curved roofs: A review.** *Journal of Building Engineering*, v. 5, p. 212–224, 2016. Acesso em: 17 set. 2025.

PFEIL, L. F. **Estruturas Metálicas.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008. Acesso em: 20 jul. 2025.

SAVORY, E. et al. **Wind loading on curved roofs.** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 89, 2001. Acesso em: 27 nov.2025.

SILVA, R. C.; PAIVA, J. B.; BRITO, F. A. **Avaliação de ligações em estruturas metálicas curvas submetidas ao vento.** *Revista Estrutura*, v. 22, n. 4, 2017. Acesso em: 10 out. 2025.

## ANEXO A

### Combinações ELU e ELS

20°	ELU (P+V) (kN)	ELU (P+S) (kN)	ELS (Vento) (kN)	ELS (Sobrecarga) (kN)
BARRA				
231	0,3515485	2,5957325	0,2774	1,77136
281	0,3846035	2,8930375	0,30403	1,97429

31°	ELU (P+V) (kN)	ELU (P+S) (kN)	ELS (Vento) (kN)	ELS (Sobrecarga) (kN)
BARRA				
132	0,287923	1,89803	0,2252	1,29575
279	0,3773655	2,7533425	0,29787	1,87962

40°	ELU (P+V) (kN)	ELU (P+S) (kN)	ELS (Vento) (kN)	ELS (Sobrecarga) (kN)
BARRA				
100	0,3442155	2,3790875	0,26862	1,62146
284	0,542132	4,092655	0,43186	2,79805

50°	ELU (P+V) (kN)	ELU (P+S) (kN)	ELS (Vento) (kN)	ELS (Sobrecarga) (kN)
BARRA				
97	0,23784	1,53473	0,18534	1,04686
273	0,323845	2,717575	0,25886	1,85456